

Autonomes System zur Herstellung von Organoblechen und Preforms

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Dr.-Ing.

eingereicht an der
Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität Augsburg

von

Alfons Schuster

Augsburg, Juli 2015



Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Kupke
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Heinz Voggenreiter

Tag der mündlichen Prüfung: 4. 12. 2015

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Motivation	9
1.2	Problemstellung	10
1.3	Über diese Arbeit	10
2	Grundlagen der Faserverbundherstellung	12
2.1	Faserverstärkte Kunststoffe und deren Bauweisen	12
2.1.1	Fasern, FVK und lastgerechtes Design	12
2.1.2	Duromere und thermoplastische Matrix	13
2.2	Automatisierung in der FVK-Produktion	14
3	System zum autonomen Greifen und Ablegen	16
3.1	Systemanforderungen und Layout	17
3.1.1	Anforderungen an das System	17
3.1.2	Fehlerkette des Systems	19
3.1.3	Systemlayout des Bildverarbeitungssystems	19
3.1.4	Algorithmen zur Zuschnittserkennung	27
3.1.5	Kommunikation mit dem Roboter	31
3.1.6	Ablaufsteuerung und Systemarchitektur	32
3.2	Validierung des Bildverarbeitungssystems	35
3.2.1	Kalibrierung des Kamerasystems und erzielbare Genauigkeit	35
3.2.2	Verlässlichkeit der Detektion	38
3.2.3	Sichere Detektion kleiner Dimensionsabweichungen	41
3.2.4	Ermittlung des Faserwinkels mittels zweidimensionaler Fast Fourier Transformation (2D-FFT)	44
3.3	Anbindung an das Robotersystem	50
3.3.1	Absolutpositionierung mit Industrierobotern	50
3.3.2	Reproduzierbares Anfahren der Messposition	51
3.3.3	Abgleich von Kamera- und Roboterkoordinatensystem	54
3.4	Systemtests	62
3.4.1	Systemvalidierung anhand von Testmustern	62
3.4.2	Stabilität des Gesamtprozesses	65
3.4.3	Thermische Drift und Zeitkonstante	66
3.4.4	Thermische Drift des Kamerasystems	67
3.4.5	Thermische Drift des Robotersystems	70
3.4.6	Erzielbare Prozessstabilität	73
3.5	Produktion aus dem Plybook	78
3.5.1	Inhalt des Plybooks	78

3.5.2	Was im Plybook fehlt	79
3.5.3	Flattening und Geometry Transfer - von 3D nach 2D und zurück . . .	81
3.5.4	Produktionsplanung: Festlegung der Reihenfolge	84
3.5.5	Saugeraktivierung	85
3.5.6	Heften	86
3.5.7	JDF-Dateiformat	86
3.5.8	Plylander - Assistenzsystem zur Beschaffung der Metainformationen .	87
3.5.9	Bedeutung der Metainformationen	89
4	Systemvalidierung anhand von Use-Cases	90
4.1	Voruntersuchungen: Infiltrierte Platte	90
4.1.1	Aufbau	90
4.1.2	Ergebnisse	91
4.2	Use-Case 1: Preforming endkonturnaher Organobleche aus PEEK-Prepreg . .	91
4.2.1	Aufbau	91
4.2.2	Ergebnisse	91
4.3	Use-Case 2: Stringerbase-Preforms aus Biax-Gelege	92
4.3.1	Aufbau	92
4.3.2	Ergebnisse	93
4.4	Use-Case 3: Rumpfschalen-Demonstrator aus thermoplastischem UD-Tape .	94
4.4.1	Aufbau	94
4.4.2	Ergebnisse	95
4.5	Bewertung	97
5	Zusammenfassung	100
	Literaturverzeichnis	102
	Anhang	107
	Danksagung	112

Abbildungsverzeichnis

3.1 Fehlerkette des Systems	20
3.2 Systemlayout	21
3.3 Auswahl von Kamera und Sensor	21
3.4 Spektrale Transmission Polfilter	22
3.5 Charakteristik der LED-Beleuchtung	23
3.6 Layout des Kamerasystems	24
3.7 Aufnahme mit und ohne Polfilter	25
3.8 Histogramm mit und ohne Polfilter	25
3.9 Gesamtsystem am Greifer	26
3.10 Vorgehensweise beim Konturvergleich	27
3.11 Vorgehen beim Template Matching	28
3.12 Kommunikation mit der Robotersteuerung	31
3.13 Auslegung des Kernsystems	32
3.14 Ablauf im KRL-Programm	33
3.15 Erweiterte Systemarchitektur	34
3.16 Ausmaß der Bildkorrekturen	35
3.17 Detektion der Eckpunkte mit Subpixel-Genauigkeit	35
3.18 Mit dem Algorithmus nach Zhang entzerrtes Bild	36
3.19 Entzerrtes Bild mit zusätzlicher Perspektivenkorrektur	37
3.20 Geometrieabweichung des Kamerabildes	38
3.21 Testbilder mit Plynummern aus Use-Case 1	39
3.22 Verlässlichkeit der Detektion für Use-Case 1	40
3.23 Verlässlichkeit der Detektion für Use-Case 2	40
3.24 Bestimmung der Maßhaltigkeit eines Zuschnitts durch Kantendetektion	41
3.25 Dimensionsvergleich zweier Zuschnitte aus Use-Case 2	42
3.26 Verbesserte Detektion durch Verwendung eines Score-Werts	43
3.27 Vergleich Detektion mit und ohne Score-Wert	43
3.28 Ermittlung der Laufrichtung von Gewebe mittels FFT	46
3.29 Ermittlung der Laufrichtung von Multiaxialgelegten mittels FFT	48
3.30 Ermittlung der Laufrichtung von UD-Tape mittels FFT	49
3.31 Anwendungsfall Autonomes Greifen	50
3.32 Roboter Genauigkeit für den betrachteten Anwendungsfall	51
3.33 Anfahren von Positionen im feineren Raster (1)	52
3.34 Anfahren von Positionen im feineren Raster (2)	52
3.35 Einfluss von Anfahrgeschwindigkeit, Beschleunigung und Bewegungsart	53
3.36 Der richtige Griff und die Folgen des Fehlgriffs	55
3.37 Kalibrierung mit der 1-Punkt x-y-Methode	55
3.38 Kalibrierung mit der Tracker-Target-Methode	57
3.39 Kalibrierung mit der Fix-Target-Methode	58

3.40	Kalibrierung mit der Vierpunkt-Methode	59
3.41	Rotation des Bildes um den TCP	60
3.42	Ergebnisse der TCP-Bestimmung über die Fixpunkt-Methode	60
3.43	Reproduzierbarkeit Schritt 1: fester Greifwinkel	62
3.44	Ablage von Testmustern nach einer Einzelaufnahme	63
3.45	Ablage von Testmustern nach einer zweiten Aufnahme im Arbeitspunkt . . .	63
3.46	Reproduzierbarkeit Schritt 2: variabler Greifwinkel	64
3.47	Ablageergebnisse bei Variation des TCP	64
3.48	Wiederholmessung in zeitlichem Abstand	66
3.49	Schematische Darstellung zur thermischen Relaxation	66
3.50	Temperatur im Kameragehäuse	68
3.51	Drift der Messwerte des Kamerasystems	68
3.52	Korrektur der Messwert-Drift des Kamerasystems	69
3.53	Drift der Halltemperatur	70
3.54	Positionsdrift der Roboterhand	71
3.55	Drift der Antriebstemperaturen	72
3.56	Wiederholversuch zur Ermittlung der Ablagestabilität	74
3.57	Stabilität des Ablageorts nach Testlauf und Drehwinkel	74
3.58	Standardabweichung des Ablageorts nach Testlauf und Drehwinkel	75
3.59	Verlauf der Maximalabweichungen	76
3.60	Geometrischer Inhalt eines Plybooks	79
3.61	Zum Bezugspunkt des Grippoints	79
3.62	Vorgehen bei Centerpoint außerhalb der Zuschnittsfläche	80
3.63	Transformation des Greifpunkts nach 3D	81
3.64	Lage von Grippoint, Droppoint und Koordinatensystemen in Use-Case 2 . .	83
3.65	Definition möglicher Reihenfolgen mittels Gantt-Diagramm	84
3.66	Vergabe von Saugernummern zur Aktivierung	86
3.67	Screenshot des Plylander-Programms	88
4.1	Thermographieaufnahme der infiltrierten Platte	90
4.2	Use-Case 1: Herstellung eines endkonturnahen Organoblechs	91
4.3	Use-Case 2: Stringerbase eines Rumpfschalendemonstrators	92
4.4	Herstellung einer Stringerbase-Preform	93
4.5	Layout des Hautfelds aus Use-Case 3	94
4.6	Greifer für Use-Case 3	95
4.7	Use-Case 3: Thermoplastisches Hautfeld	96

Tabellenverzeichnis

3.1	Parameter des Bildverarbeitungssystems	38
3.2	Erzielbare Ablagegenauigkeit nach Prozess	65
3.3	Übersicht der Zeitkonstanten	67
3.4	Zeitkonstanten für die Erwärmung der Roboterantriebe	72
3.5	Amplitude, Zeitkonstante und Stabilisierungszeit der untersuchten Störeinflüsse	73
3.6	Übersicht der zusätzlich zu bestimmenden Koordinaten und Dreibeine	83
4.1	Zusammenfassung der Prozesszeiten pro Zuschnitt	97
4.2	Legeraten mit und ohne QS-Aufnahme	98

Listings

1	Plybook ohne Cutpieces	107
2	Plybook mit Cutpieces	108
3	ASCII-Export der für den Legevorgang benötigten Informationen	109
4	Job Definition File (JDF)	110
5	Ausgabe des Programms „PlyLander”	111

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Carbonfaserverstärkte Kunststoffe, kurz CFK, werden seit den 1950er Jahren erfolgreich für Strukturkomponenten in der Luft- und Raumfahrt in ständig wachsenden Anwendungsgebieten eingesetzt. Es existiert eine Vielzahl von gut beherrschten Herstellverfahren, die meist sehr spezifisch sind [1]. Allgemein kann festgestellt werden, dass gerade auch wegen der eben genannten Spezifität der Herstellverfahren, jenseits einiger besonderer Anwendungen wie etwa Tapelegen, Wickeln oder Pultrusion meist nur ein geringer Automatisierungsgrad rentabel und damit sinnvoll umsetzbar ist, weswegen derzeit auch ein gewisser Mangel an für die CFK-Produktion geeigneten flexiblen Produktionssystemen erkennbar ist [2, 3]. Da im CFK-Bereich auch ein hoher Kostendruck herrscht werden diese Produktionssysteme um so dringender benötigt.

Die weiterhin steigenden Anforderungen an das Strukturgewicht für zivile Luftfahrzeuge führt zusammen mit den geforderten Stückzahlen zu einem gesteigerten Bedarf an innovativen Produktionstechnologien, unter anderem stehen hierbei carbonfaserverstärkte Kunststoffe im Fokus [4]. Auch hier herrscht starker Kostendruck und der erzielte Nutzen muss sorgfältig mit dem benötigten Aufwand verglichen werden [2]. Die Reduzierung der Durchlaufzeiten und damit die Steigerung der Legeraten durch Automatisierung bietet dabei eine gute Möglichkeit zur Kostenkontrolle. Im Gegensatz zu den beispielsweise in der Automobilindustrie anzutreffenden, eher hochvolumigen Anwendungen, wo man in hunderten von Bauteilen pro Tag denkt, sind die Stückzahlen bei Luftfahrtanwendungen gering. Dem stets wiederkehrenden Serienprodukt in der Automobilindustrie steht die in der Luftfahrt vergleichsweise hohe Größe und Komplexität der Bauteile verbunden mit der auf einen eher langen Zeitraum verteilten Produktionsschritte gegenüber. Automatisierungsansätze aus der Großserienproduktion können folglich nicht direkt auf die Produktion von Luftfahrtbauteilen übertragen werden ohne den besonderen Variantenreichtum und individuellen Ablauf der Produktionsschritte zu berücksichtigen.

Eine besondere Anforderung an ein für diese Anwendung geeignetes Produktionssystem ist hierbei die Notwendigkeit, die Generierung von Positionswerten möglichst ausschließlich in der digitalen Welt, sprich am CAD-Arbeitsplatz oder ggf. in nachgelagerten, aber automatisierten Schritten, vorzunehmen. Komplexe Lagenaufbauten von veränderlicher Geometrie müssen automatisiert erstellbar sein, und eine manuelle Eingabe von Positionswerten (sog. Teachen) kann aufgrund der Vielzahl der jeweils leicht unterschiedlichen Arbeitsschritte in Verbindung mit den geringen Bauteilkadenzen nicht als sinnvoller Lösungsansatz gesehen werden.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Untersuchung eines wandlungsfähigen Produktionssystems, das diese Automatisierungslücke schließen kann: Die Überführung von digital vorliegenden Faserverbundbauteilen in die reale Welt durch die Kombination eines Industrieroboters mit einem Computer-Vision System - das System zur autonomen Preform-erstellung.

1.2 Problemstellung

Um den im vorangegangenen Abschnitt formulierten Anforderungen Rechnung zu tragen sollte das zu betrachtende System näher umrissen werden: es wird ein flexibles und anpassungsfähiges System benötigt, das gleichzeitig in seiner Funktionsweise robust ist. Ein gängiger Weg zur kosteneffizienten Automatisierung ist der Einsatz von Industrierobotern, der allerdings überwiegend auf die Handhabung biegesteifer Materialien und stets wiederkehrende Produktionsabläufe beschränkt ist. Am DLR Zentrum für Leichtbau-Produktionstechnologie (ZLP) in Augsburg wird intensiv an der Anwendung und Verbesserung dieser Techniken für die Herstellung von Faserverbundbauteilen aus biegeschlaffen textilen Halbzeugen geforscht. Im Rahmen dieser Arbeit sollen die am ZLP vorhandenen Industrieroboter, ausgestattet mit aus weiteren Forschungsprojekten verfügbaren Greif- und Ablagetechnologien, an ein zu erstellendes Bildverarbeitungssystem sowie an die prototypisch zu erstellende digitale Prozesskette angebunden und hinsichtlich der erreichbaren Prozessparameter wie z. B. Robustheit, Geschwindigkeit oder Ablagegenauigkeit untersucht werden. Ein zentraler Baustein ist dabei auch die Software, die dem Bildverarbeitungssystem die Funktion verleiht und den Roboter mit den für eine Produktion aus den vorgegebenen CAD-Daten benötigten Anweisungen versorgt. Am Ende steht die Validierung des Systems anhand von Use-Cases aus der Herstellung von Organoblechen und Preforms.

In mehreren am ZLP Augsburg laufenden Projekten konnten entsprechende Use-Cases identifiziert werden: das Preforming endkonturnaher Thermoplast-Organbleche und für in Infiltrationsverfahren hergestellte Duomerbauteile zeichnen sich beide durch einen komplexen Lagenaufbau mit bis zu einigen hundert von ähnlichen, aber nicht exakt gleichen Zuschnitten aus. Die manuelle Bauteilerstellung erfordert hier ein hohes Maß an Präzision bezüglich der Ablage, wodurch sich häufig Probleme bei der Durchführung ergeben. Beide Herstellverfahren können von der Verwendung des oben vorgeschlagenen Systems profitieren und liefern Anregungen und Auslegungskriterien. Für die endkonturnahen Organobleche vereinfacht sich die Problemstellung auf zwei Dimensionen, da ein Organoblechstack erst im späteren Verlauf seine 3D-Form z. B. durch Heißpressen erhält. Bei der Herstellung von Preforms für Duomerbauteile muss bereits die dritte Dimension berücksichtigt werden, da ein Umformen nach der Ablage im Prozess nicht vorgesehen ist. Als dritter und letzter Use-Case wird die Herstellung einer thermoplastischen Rumpfhaut mit lokalen Verstärkungen untersucht, wobei neben dem echten 3D-Preforming als zusätzliche Schikanen stumpfe Stöße des Materials berücksichtigt werden müssen.

1.3 Über diese Arbeit

Da die Ergebnisse dieser Arbeit aus Forschungsprojekten stammen wurden naturgemäß Präsentationen gehalten und Publikationen erstellt, auf die hier ausdrücklich hingewiesen sei. Es handelt sich neben einiger kleinerer Nennungen in Übersichtsvorträgen um Präsentationen auf der JEC [5] und in der Arbeitsgruppe Automatisierung des Carbon Composites e.V. [6]

sowie auf dem 63. Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress [7, 8]. Auf eine explizite Kennzeichnung eigener Ergebnisse, die in den genannten Veröffentlichungen in relativ geringer Detailtiefe erscheinen, wurde im Sinne der Lesbarkeit dieser Arbeit verzichtet. Um den Fokus schnell auf den Kern der Arbeit zu richten wird, bis auf eine kurze Einleitung über Faserverbundherstellung, von allgemeinen Einführungen Abstand genommen. Aufgrund der interdisziplinären Ausrichtung wurde vorgezogen, einleitende oder weiterführende Aspekte im laufenden Text an der thematisch jeweils relevanten Stelle kurz anzuführen.

Kapitel 2

Grundlagen der Faserverbundherstellung

2.1 Faserverstärkte Kunststoffe und deren Bauweisen

2.1.1 Fasern, FVK und lastgerechtes Design

Faserverstärkte Kunststoffe, kurz FVK, zeichnen sich aus durch geringe Dichte und hohe Festigkeit und Steifigkeit. Im Gegensatz zu metallischen Werkstoffen oder unverstärkten Kunststoffen handelt es sich um kein Bulk-Material, sondern um einen Verbundwerkstoff aus in eine Kunststoffmatrix eingebetteten Fasern. Die Fasern können dabei kurz oder lang und aus verschiedensten Werkstoffen sein, die Matrix wird nach Typ des Kunststoffes grob nach Duromer und Thermoplast unterteilt. Kurzfasern werden in vielen Bereichen eingesetzt, wo die Eigenschaften eines wenig belastbaren Kunststoffes verbessert werden sollen; im Rahmen dieser Arbeit gilt das Interesse den Carbon-Endlosfasern. Carbonfasern werden durch einen mehrstufigen Prozess unter Einsatz großer Energiemengen aus sog. Precursoren (Fasern aus PAN¹ oder Pech²) hergestellt. Am Ende des Prozesses steht die Pyrolyse, bei der eine graphitartige Anordnung der Kohlenstoffatome entsteht. Die Fasern alleine widerstehen nur Zugbelastungen, sind jedoch praktisch widerstandslos gegen Druck- und Scherbelastung. Hier kommt die Matrix ins Spiel: erst durch die kraftschlüssige Verbindung der Fasern entsteht aus dem Textil ein praktisch verwendbarer Werkstoff. Dieser bleibt anisotrop und kann bei geeignetem konstruktivem Einsatz zu enormen Gewichtseinsparungen führen, sofern die Krafteinleitung als Zugbelastung entlang der Faser erfolgt. Hiermit ist eigentlich das Kernproblem bzgl. FVK und Leichtbau formuliert: es handelt sich nicht einfach um einen hochfesten, leichten Werkstoff, den man wie Stahl oder Aluminium als Bulk-Material kaufen und mehr oder weniger nach Belieben zerspanen oder umformen kann. Maximale Gewichtseinsparung kann nur erreicht werden, wenn man die Fasern möglichst genau nach den eingekoppelten Lasten ausrichtet. Dies geschieht in der Regel in einem mehrstufigen Prozess aus geeigneten Preforming-Techniken in Verbindung mit einem nachfolgenden Verbinden mit der Matrix - der Werkstoff entsteht also erst in der Fertigung. Diese neue Komplexität schafft nicht nur Gewichtsersparnis und konstruktive Freiheitsgrade, sie verursacht auch Kosten und stellt eine Herausforderung an Bauweisen und Produktionstechnik dar. Dies ist der Grund, weshalb diese High-End-Werkstoffe derzeit weniger im Maschinen- und Anlagenbau, sondern überwiegend im Bereich der Luft- und Raumfahrt eingesetzt werden. Hier stehen Komponentenhersteller bzgl. Gewichtseinsparung unter großem Druck, was mit einer hohen Motivation zum Einsatz auch schwierig zu verarbeitender Werkstoffe einhergeht. Neben der

¹Polyacrylnitrilfasern, hergestellt durch Fällspinnen.

²Herstellung nach Reinigung des Ausgangsstoffs durch Schmelzspinnen.

Bauweise ist, wie auch beim Metall, also stets auch die Produktionstechnik zu betrachten; sie ist bei FVK aufgrund der erheblich kürzeren Verfügbarkeit³ weniger erforscht und standardisiert. Für die Verarbeitung von Carbonfasern zu trockenen Halbzeugen kommt die gesamte Palette der textiltechnischen Herstellverfahren zum Einsatz und es entstehen Gelege, Gewebe, seltener Geflecht, Gestrick und sogar Vlies. Das Vernähen von Rovings unterschiedlicher Ausrichtung zu multiaxialen Gelegen gehört zum Standard, weniger häufig findet man strukturelles Nähen oder Sticktechnik im sog. Tailored Fiber Placement, was jedoch bereits weit über die Halbzeugerstellung hinausgeht und eher beim Preforming anzusiedeln ist. Je mehr die Rovings in ihrer Ausrichtung variieren (sog. Ondulation), desto weniger Nutzen kann man aus den Materialeigenschaften ziehen, daher scheiden Verfahren, die zu einer starken Ondulation führen, häufig aus. Interessanterweise gibt es gerade für Bauteile mit mehr oder weniger isotroper Faserausrichtung das Einsatzgebiet der Crashabsorber. Beispielsweise kann eine Carbon-Crashbox bei ihrer Zerstörung sehr effektiv kinetische Energie vernichten, indem möglichst viele Fasern brechen und ihren Zusammenhalt in der Matrix verlieren.

2.1.2 Duomere und thermoplastische Matrix

Als Matrixwerkstoff für FVK finden duomere und thermoplastische Kunststoffe Verwendung. Im Fall der duomeren Matrix gibt es zwei Herstellpfade: trockenes Preforming aus Fasern und textilen Halbzeugen mit anschließender Einbringung des flüssigen Matrixwerkstoffs oder herstellerseitiges Vortränken der textilen Halbzeuge mit Harz (sog. Prepreg).

Trockene Preforms müssen in oder um eine einseitige Form aufgebaut oder in oder um eine solche eingebracht werden und anschließend z. B. durch die Aufbringung eines Vakuumsacks und den Aufbau von Unterdruck mit Harz infiltriert werden (sog. Vakuuminfusion, VAP⁴ oder VARI⁵) oder in einem zweiseitigen, geschlossenen und formstabilen Werkzeug durch Überdruck mit Harz quasi vollgepumpt werden (RTM⁶, RIM⁷). Der Zusammenhalt des Preforms entsteht i.d.R. durch sog. Binder, ein Material, das zunächst nicht haftet und erst durch die Einbringung von Temperatur aktiviert wird. Idealerweise werden die Lagen des Preforms nur so stark miteinander verbunden, dass sie beim Vakuumaufbau in die gewünschte finale Lage gleiten können. Ebenso muss der Binder mit dem bei der folgenden Infusion verwendeten Harzsystem abgestimmt werden. Dies kann z. B. durch die Verwendung von nicht gänzlich ausreagiertem chemisch „kompatiblen“ Harz als Binder verwirklicht werden. Infiltrierte duomere Bauteile werden je nach Harzsystem ggf. im Ofen ausgehärtet.

Duomere Prepregs hingegen sind ab Werk mit Harz getränkt, das durch tiefe Temperatur (-18 °C) bis zur Verarbeitung davon abgehalten wird zu reagieren. Lagerung und Verarbeitung sind daher erschwert und es entsteht ein erhöhter Materialaufwand für die benötigten Trennfolien. Die Harzmenge ist voreingestellt, und um die vorimprägnierten Fasern nahe genug zusammenzubringen, erfolgt die Weiterverarbeitung im sog. Autoklaven, einem überdruckbeaufschlagten, geschlossenen Ofen. Als Prepreg können auch sehr dünne UD-Tapes mit unidirektionaler Faserausrichtung eingesetzt werden, wodurch Bauteile mit den besten gewichtsbezogenen Festigkeitswerten entstehen.

Im Fall der thermoplastischen Matrix wird der Matrixwerkstoff herstellerseitig bei hohen Temperaturen aufgebracht, so dass nach Abkühlung ein trockenes Prepreg entsteht, das bei

³Kupferzeit ab etwa 5500 v. Chr., Bronzezeit ab etwa 3000 v. Chr., Eisenzeit ab etwa 1200 v. Chr.

⁴Vacuum Assisted Process

⁵Vacuum Assisted Resin Infusion

⁶Resin Transfer Moulding

⁷Reaction Injection Moulding. Harz und Härter werden erst bei der Injektion gemischt

Raumtemperatur lagerfähig ist. Die entstehenden UD-Tapes, Gewebe oder Gelege weisen gegenüber trockenen Halbzeugen relativ hohe Eigensteifigkeit und gute Handhabbarkeit auf. Die Eigensteifigkeit führt oft dazu, dass das Material ein gewisses Bestreben zeigt, in seine ursprüngliche, aufgerollte Form zurückzukehren, so dass bereits auf dem Schneidtisch erste Herausforderungen an die Verarbeitung entstehen können. Zuschnitte können durch lokales Erhitzen, beispielsweise durch Ultraschallschweißen, miteinander zu Lagenpaketen verbunden werden. Auf diese Weise sind nahezu beliebige, endkonturnahe Preforms herstellbar; man spricht in diesem Zusammenhang von Organoblechen. Am Ende des Bauteilerstellungsprozesses steht eine Konsolidierung unter Vakuum im Ofen oder ein Pressschritt in einer geeigneten Heißpresse. Die beim Duomer bestehenden Anforderungen an das Gleiten der Lagen untereinander bestehen auch hier.

Neben den genannten, zuschnittsorientierten Verfahren existieren für beide Matrixwerkstoffklassen die quasikontinuierlichen Herstellverfahren Tape- oder Faserlegen, Wickeln und Pultrusion. Tapelegen eignet sich aufgrund der dünnen Ausgangsmaterialien besonders für große, leicht gekrümmte Bauteile wie z. B. Rumpfschalen oder Druckkalotten. Meist zylinderähnliche Halbzeuge und Bauteile entstehen in großen Volumina durch Wickeln, beispielsweise Leichtbau-Tanks oder Rohre, gelegentlich bei Sonderformen auch durch Flechten (Stoßfänger BMW M6). Für die Endlosfertigung von Halbzeugen wie Stangen, Profilen oder Rohren kommt die sog. Pultrusion in Betracht, bei der in einem kontinuierlichen Prozess Fasern und Matrix zugeführt und verarbeitet werden.

Einen Überblick über Material und Herstellverfahren gibt [9, 10].

2.2 Automatisierung in der FVK-Produktion

Sämtliche hier erwähnten Fertigungsprozesse haben ihre spezifischen Herausforderungen und sind in der manuellen Anwendung gut erforscht und auch beherrscht. Lange Zeit bestand aufgrund der relativ geringen Stückzahlen und der hohen Bauteilvarianz nur geringer Handlungsbedarf bzgl. Automatisierung. Durch die gestiegene Nachfrage in der zivilen Luftfahrt und mittlerweile auch in der Automobilindustrie besteht in den letzten Jahren ein gesteigerter Bedarf an automatisierter Fertigung.

Für die Herstellung schalenförmiger Bauteile sind mittlerweile große Portalanlagen zum Tape- oder Faserlegen etablierter Stand der Technik. Dies wird kombiniert mit einer Vielzahl von weiteren, auch manuellen Fertigungsschritten. Portalanlagen bestechen durch ihre Präzision, verursachen aber auch hohe Anlagenkosten. Ein gängiger Weg zur kosteneffizienten Automatisierung ist der Einsatz von Industrierobotern, der derzeit allerdings überwiegend auf die Handhabung biegesteifer Materialien und stets wiederkehrende Produktionsabläufe beschränkt ist. Ansatz am DLR Zentrum für Leichtbau-Produktionstechnologie in Augsburg ist die Verwendung von Industrierobotern für die Herstellung komplexer Faserverbundbauteile, wobei der Schwerpunkt auf der Verarbeitung trockener Halbzeuge und thermoplastischer Prepregs liegt. Ziel ist dabei ein System, das ohne Teachin der Roboter komplexe Lagenaufbauten aus biegeschlaffem Material von veränderlicher Geometrie automatisiert erstellen kann.

Nicht zu vergessen in diesem Zusammenhang ist, dass erst die Anbindung an das CAX-System für eine durchgängige Prozesskette sorgt. Für die zerspanende Fertigung ist dies längst Stand der Technik, Fräsmaschinen verarbeiten bereits seit Jahrzehnten CNC-Files; es gibt in den letzten Jahren auch hier einen Trend zur Simulation entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Auch im Falle des Tapelegens besteht diese Anbindung bereits: speziell für diesen Einsatzzweck entwickelte Software unterstützt den Anwender bei der Maschinenein-

richtung und -bedienung. Der gesamte Fertigungsprozess wird digital nachgebildet, um zu garantieren, dass das Produkt auch nach den CAD-Daten korrekt und störungsfrei gefertigt werden kann. Im Falle der Verwendung von Industrierobotern ist noch viel Arbeit zu leisten. Roboter sind in der Regel darauf ausgelegt, einmal eingeteachte Bahnpunkte immer wieder anzufahren. Simulationswerkzeuge wie z.B. Dassaults DELMIA bilden lediglich diesen Teachprozess digital nach und eignen sich damit hervorragend für Entwurf und Optimierung von Fertigungsstraßen - aber auch für nicht viel mehr. Aus dem Bereich der Lackieranwendungen entstanden daher DELMIA-Erweiterungen für 3D-Oberflächenprozesse wie z. B. FASTSURF, womit sich diese Prozesse parametrisiert abbilden lassen, um die vom Roboter benötigten Stützpunkte zu generieren. Der Teachaufwand wird durch diese Systeme reduziert, alle Bewegungen und mögliche Kollisionen werden am Computer vorab simuliert. Für den hier betrachteten Fall der Herstellung von Faserverbund-Bauteilen aus Zuschnitten mittels Industrierobotern gibt es noch keine digitale Prozesskette und durchgängige Prozesssimulation. Da die Notwendigkeit den Roboter manuell zu teachen letztlich entfallen muss, muss eine direkte Anbindung an die CAX-Kette geschaffen werden und es müssen Werkzeuge zur Prozesssimulation und automatischen Generierung von kollisionsfreien Bahnen geschaffen werden. Die vorliegende Arbeit leistet hierzu einen Beitrag und befasst sich mit Architektur und Umsetzung eines autonomen Fertigungssystems für den genannten Anwendungsfall.

Kapitel 3

System zum autonomen Greifen und Ablegen

Bei der Herstellung von nicht ebenen Faserverbundbauteilen werden ganz allgemein gesprochen eben bzw. zweidimensional vorliegende Ausgangsmaterialien in eine dreidimensionale Form überführt. Wenn ebene Halbzeuge verwendet werden ist, abgesehen von Spezialfällen, die richtige Formgebung der 2D-Zuschnitte besonders wichtig, um nach der Überführung in den dreidimensionalen Endzustand eine möglichst gute Übereinstimmung mit der gewünschten 3D-Form herzustellen. Da die Materialien dabei wiederum vom Ablegeprozess selbst abhängigen Verformungen bzw. Verscherungen unterliegen, wird durch die Anwendung geeigneter numerischer Methoden sowohl in kommerziellen Anwendungen als auch in der aktuellen Forschung danach getrachtet, diesen Vorgang möglichst realitätsnah zu modellieren (z. B. [11]). Auf Basis der in einer geeigneten Software, in unserem Fall Dassault's CATIA, zugrundegelegten CAD-Daten kann diese so genannte Drapiersimulation durchgeführt werden, was im Regelfall zu einer Vielzahl aus unregelmäßig geformten Zuschnitten führt. Da alle diese Zuschnitte bei einer weiteren Verarbeitung mit in der Automatisierungstechnik üblichen Positioniersystemen für die positionsgenaue Ablage zunächst auch positionsgenau gegriffen werden müssen, würde bei der Verwendung dieser Systeme bereits im Vorfeld erheblicher Aufwand entstehen, um die zugeschnittenen Ausgangsmaterialien in korrekter Ausrichtung an eine vordefinierte Position zu bringen, von der sie lagerichtig aufgenommen werden können. Ein Zugewinn an Produktivität kann im allgemeinen Fall so nicht erreicht werden, da dem automatischen Greifen und Ablegen für jeden Zuschnitt individuelle manuelle Ausrichtarbeiten vorausgehen müssten, die den Ablauf zeitlich einschränken würden oder nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand ausgeführt werden könnten. Automatisierungspotenziale können somit nur für Spezialfälle gehoben werden, in denen die zugeschnittenen Ausgangsmaterialien regelmäßig geformt sind (z. B. Zylindergeometrie) oder in denen wenige gleiche Zuschnitte sehr häufig vorkommen und der Ausrichtvorgang in wenigen Varianten stets wiederkehrt. Dem Positioniersystem, im vorliegenden Falle ein Sechssachs-Knickarm-Roboter, muss für die Beherrschung des allgemeinen Falls also die Fähigkeit verliehen werden, das zu greifende, unregelmäßig geformte Material visuell wahrzunehmen und darauf basierend korrekt aufzunehmen (Abb. 3.2, Abb. 3.9). Im Folgenden wird am Beispiel der Kombination eines Industrieroboters mit einem Computer-Vision-System aufgezeigt wie ein solches System gestaltet werden kann, um autonom, also ohne den regulierenden Einfluss eines Bedieners, Organobleche oder Preforms aus Faserverbundmaterial herzustellen.

Bildverarbeitungssysteme haben seit den 1990er Jahren einen Siegeszug durch alle Disziplinen der Automatisierung angetreten und stoßen mittlerweile auch immer weiter in den

kommerziellen Bereich vor. Da die benötigte Hardware immer günstiger und gleichzeitig leistungsfähiger geworden ist, haben die Bildverarbeitungssysteme die Nische der Sonderanwendungen verlassen, und mittlerweile gibt es kaum einen Bereich der Automatisierung, in denen keine Bildverarbeitungssysteme eingesetzt werden können. Bildverarbeitungssysteme kontrollieren den Druck von Geldscheinen oder die Form von Obst und Gemüse, sie assistieren beim Autofahren oder beim Befüllen von Flaschen, es ist schlicht nicht möglich die Vielzahl und Variabilität der Anwendungen zu beschreiben. So vielfältig die Anwendungen sind, so vielfältig sind auch die Lösungen. Eine unüberschaubare Vielzahl von Unternehmen und Technologieschmieden sind damit befasst immer neue Herausforderungen anzunehmen und Probleme zu lösen. Eines bleibt gemeinsam: Die Lösung muss auf den konkreten Anwendungsfall angepasst werden.

Im vorliegenden Fall ist die Herausforderung der Umgang mit einer Vielzahl von individuellen Zuschnitten, die primär in digitaler Form vorliegen und auf Basis des digitalen Datenbestands positionsgenau zusammengefügt werden müssen. Die mittels Drapiersimulation bestimmten 2D-Konturen werden benutzt, um eine digitale Repräsentation der Zuschnittsform in der zum verwendeten Kamerasystem passenden Auflösung zu generieren. Durch den Abgleich der entstehenden Soll-Bitmap mit dem Kamerabild lassen sich Koordinaten und Drehwinkel der im Blickfeld der Kamera beliebig platzierten Zuschnitte bestimmen. Nach Koordinatentransformation ins Robotersystem können die Zuschnitte ohne weitere Interaktion des Benutzers gegriffen und an die wiederum aus dem CAD stammenden korrekten 3D-Positionen abgelegt werden. Das autonome Greifsystem kann somit Zuschnitte, die lediglich grob eingebracht wurden, korrekt aufnehmen und selbständig weiterverarbeiten, wodurch die oben genannten Automatisierungseinschränkungen bei der Materialeinbringung und -ausrichtung überwunden werden.

3.1 Systemanforderungen und Layout

3.1.1 Anforderungen an das System

Um ein Bildverarbeitungssystem auf Industrietauglichkeit auszulegen, müssen neben der zu lösenden Bildverarbeitungsaufgabe bereits zu Beginn der Auslegung die Einsatzbedingungen geklärt werden. Hierfür wurde im vorliegenden Fall die Herstellung von Faserverbundbauteilen aus textilen Carbonfaser-Halbzeugen mittels Industrierobotern unter möglichst produktionsnahen Bedingungen angenommen. Im Folgenden sind Randbedingungen und Annahmen angegeben, die für die Systemauslegung relevant sind:

1. Da das System mit einem Industrieroboter autonom operieren soll, ist es im Sinne der Komplexitätsvermeidung wichtig und sinnvoll, den Arbeitsraum des Roboters möglichst nicht zu beeinflussen bzw. in keinsten Weise einzuschränken. Jegliche Komponenten im Arbeitsraum, die bei der Bewegung des Roboters berücksichtigt werden müssen, sind zu vermeiden. Möchte man zusätzlich den Aufwand für eine dauerhaft stabile Montage, beispielsweise an einem Galgen oder Portal über der Gesamtanlage vermeiden, erscheint es unausweichlich, das Gesamtsystem aus Kamera und Beleuchtung direkt am Robotergreifer zu montieren. Als Nebenbedingung ergibt sich durch die Armlänge und Reichweite der verwendeten Roboter vom Typ KR210 R3100 ultra ein sinnvoller Arbeitsabstand von ≈ 1 m.
2. Bezüglich der Beleuchtungssituation an einem dauerhaften Arbeitsplatz können ohne unmittelbare technische Notwendigkeit keine Einschränkungen wie z. B. Abschottung

von der Umgebung getroffen werden [12], daher soll das System unabhängig vom Umgebungslicht funktionieren, d. h. über eine eigene Beleuchtung verfügen die hell genug ist, um aus dem Umgebungslicht resultierende, die Detektion störende Einflüsse zu eliminieren. Carbonfasern können bei Wellenlängen im sichtbaren Bereich als ideale, zylindrische Spiegel angesehen werden, weswegen Carbonfaserhalbzeuge typischerweise stark richtungsabhängige Reflexionseigenschaften zeigen. Die Beleuchtung darf also nicht so ausgestaltet werden, dass intermittierend auftretende Reflexionen eine sichere Detektion verhindern.

3. Da das Wirkprinzip der meisten Greifer für luftdurchlässige Textilien Niederdruck-Flächensaugen ist, soll die Aufnahme der Zuschnitte von einer luftdurchlässigen Platte erfolgen. Auf diese Weise wird verhindert, dass sich die Zuschnitte am Aufnahmetisch quasi festsaugen und somit die Aufnahme nur sehr langsam vonstatten gehen kann. Das Bildverarbeitungssystem sollte folglich fähig sein, mit beispielsweise gelochten Platten als Hintergrundmotiv umzugehen und keine weiteren besonderen Anforderungen an den Untergrund einbringen.
4. Bei einem Einsatz unter realen Fertigungsbedingungen in einer CFK-Produktion ergibt sich unmittelbar die Anforderung nach möglichst absoluter Staumdichtigkeit, da ein Eindringen der leitfähigen Carbonfasern das System zumindest in der Funktion beeinträchtigen oder sogar durch Kurzschluss zerstören würde. Gleichzeitig darf die daraus abzuleitende Abschirmung von der Umgebung nicht zu einer Überhitzung des nun auch thermodynamisch weitgehend entkoppelten Systems führen. Ein Austausch von Raumluft zur Kühlung ist möglichst zu vermeiden, da sonst Feinstaubfilter in den Luftstrom eingesetzt werden müssen, die im Produktionsbetrieb wiederum turnusmäßig zu warten sind.
5. Als charakteristische Maximalgröße für Zuschnitte kann aufgrund des derzeit vertretenen Größenspektrums in laufenden Projekten $\approx 1,5 \text{ m} \times 2,0 \text{ m}$ angenommen werden. Dies führt zusammen mit dem Arbeitsabstand von 1 m zu einem relativ weiten Blickwinkel von ca. $\pm 90^\circ$, d. h. es muss mit Optiken geringer Brennweite und den damit verbundenen optischen Effekten umgegangen werden.
6. Neben den unmittelbar technisch motivierten Anforderungen sollte die Detektionsrate bei Vorhandensein des Zuschnitts (richtig positive Klassifizierung) bei $\geq 99 \%$ sowie bei nicht Vorhandensein des Zuschnitts (falsch positive Klassifizierung) $\leq 10^{-6}$ sein. Die sehr strenge Anforderung für die irrtümlich positive Detektion ist der Tatsache geschuldet, dass ein nicht erkannter Zuschnitt lediglich einen Produktionsstopp nach sich zieht, wohingegen ein falsch positiv klassifizierter Zuschnitt vom Bediener un bemerkt vom System verbaut würde, was infolge der verspäteten Erkenntnis zu einem Ausschussbauteil führen würde.
7. Das System muss in der Lage sein, pathologische Fälle wie quadratische oder kreisförmige Zuschnitte abzudecken. Als Option für die Zukunft soll es auch möglich sein, auch auf anderen Zuschnitten liegende Zuschnitte sicher zu erkennen. Die damit verbundene Schwarz-auf-Schwarz-Detektion stellt weitere Anforderungen an die Farbtiefe und das Rauschverhalten des Sensorchips.
8. Als Ziel für die erforderliche Gesamtgenauigkeit wurde $0,25 \text{ mm}$ für die Detektion und $0,5 \text{ mm}$ für den gesamten Prozess aus Detektion, Greifen und Ablegen festgelegt. Grund

für die relativ enge Tolerierung ist, dass auch Layups mit stumpfen Stößen zumindest prinzipiell beherrschbar sein sollen.

9. Das System muss so gestaltet werden, dass ein präsentiertes Set aus Zuschnitten bei einer gegebenen Ablagereihenfolge autonom abgearbeitet werden kann. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, mit der Robotersteuerung dergestalt zu kommunizieren, dass diese in die Lage versetzt wird, Zuschnitte korrekt aufzunehmen und auf die in der Konstruktion festgelegten Wunschpositionen abzulegen. Die entsprechenden CAD-Daten müssen dabei vom System verarbeitet und letztlich von der Robotersteuerung korrekt in Bewegung umgesetzt werden.

Im Herbst 2011 wurde damit begonnen, auf Basis dieser Anforderungen ein Bildverarbeitungssystem zu konzipieren, das in der Lage ist, Zuschnitte aus Carbonfaserhalbzeugen korrekt zu erkennen und zu greifen. Nach schnellen Erfolgen bei der Detektion wurde im weiteren Verlauf klar, dass dem eben genannten letzten Punkt eine zunächst unterschätzte, essenzielle Rolle zukommt, die selbstverständlich klingt und einfach zu spezifizieren ist, aber nur auf durchaus nicht triviale Weise in die Realität umgesetzt werden kann. Neben der Schwierigkeit, den Roboter als Absolutpositioniersystem zu betreiben und damit für konsistente Koordinatentransformationen zu sorgen (siehe Abschnitt 3.3.1 und 3.3.3), muss auch weit genug in die digitale Prozesskette eingestiegen werden, um einen zumindest prototypischen Workflow zu implementieren, der dem System überhaupt erst gestattet autonom zu agieren (Abschnitt 3.5).

3.1.2 Fehlerkette des Systems

Bereits beim Systementwurf sollte die Betrachtung der möglichen Fehler und deren Auswirkungen begonnen werden. Je nach Ergebnis der Analyse sind unterschiedliche Faktoren zu prüfen und Einflüsse zu untersuchen und ggf. der Systementwurf anzupassen. Eine Übersicht über die Fehlerursachen des vorgestellten Systems gibt Abb. 3.1, die entsprechenden Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt.

Für das Bildverarbeitungssystem, das in der Prozesskette am Anfang steht, ist eine korrekte Detektion von höchster Wichtigkeit. Bei Fehldetektionen sind zwei Fälle zu unterscheiden, irrtümlich positive und irrtümlich negative Detektion. Besonders folgeschwer sind die falsch positiven Detektionen, denn dieser Fall führt zu einem Fehler im Bauteil. Eine falsch negative Detektion führt lediglich zum Produktionsstopp. Eine genauere Betrachtung hierzu findet sich in Abschnitt 3.2.2 und 3.2.3.

Im Fall der korrekten Detektion stellt sich zunächst die Frage nach der Genauigkeit der Detektion und des Robotersystems beim Greifen und Ablegen. Die zumindest kurzzeitig hierbei erzielbaren Werte entscheiden über die Ablagetoleranz Δx und letztlich darüber, ob das Bauteil gut oder schlecht gefertigt wird (Abschnitt 3.2.1 und 3.3.1 bis 3.3.3).

Weiterhin kann sich die Genauigkeit des Systems mittel- bis langfristig verändern. Diese Drift (induziert durch Temperaturänderungen ΔT) führt zu einer zeitabhängig schwankenden Bauteilqualität und somit zu einer instabilen Produktion (Abschnitt 3.4).

3.1.3 Systemlayout des Bildverarbeitungssystems

Mechanischer Aufbau

Aufbauend auf Abschnitt 3.1.1 konnte nun das Systemlayout begonnen werden. Aus Bildverarbeitungssicht ideal wäre die Bildaufnahme im Durchlicht oder die Verwendung einer

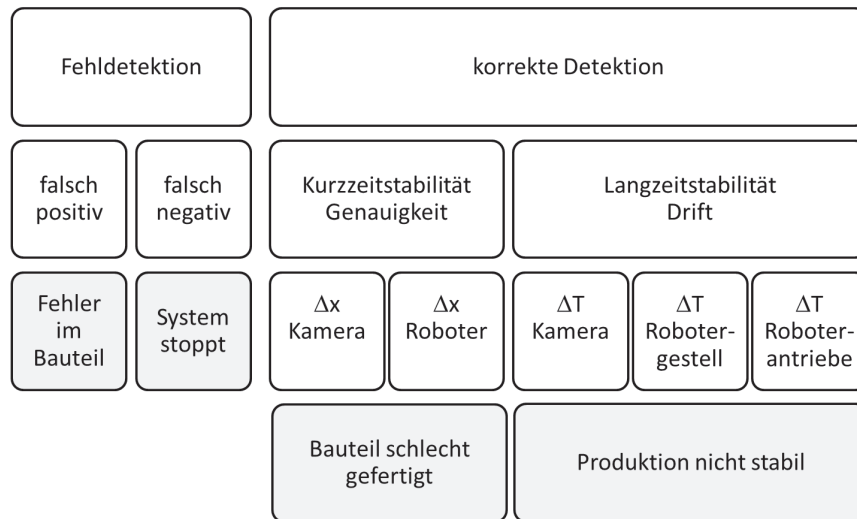
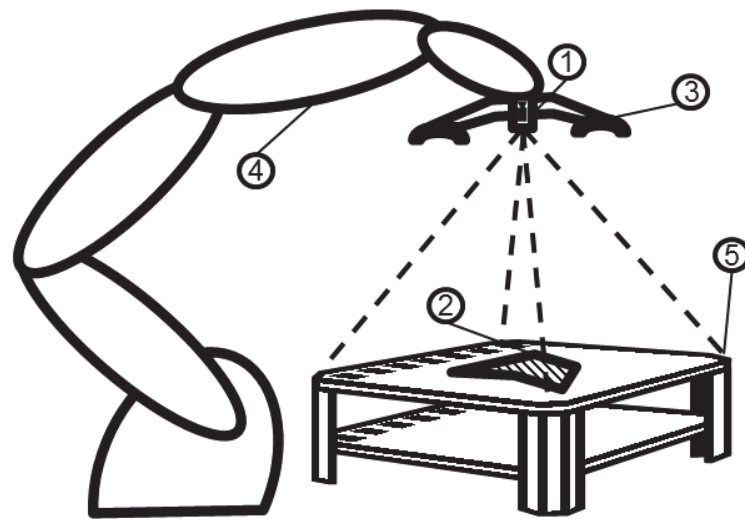


Abbildung 3.1: Fehlerkette des Systems

0°/45°-Geometrie, wobei die Kamera direkt auf den Aufnahmetisch blickt und die Beleuchtung die Zuschnitte unter $\pm 45^\circ$ ausleuchtet. Beide Ansätze sind hinsichtlich der Vermeidung von störenden Reflexionen (vgl. Anforderung 2) überlegen. Ausgehend davon, dass das System später in einer Roboterzelle eingesetzt werden soll, haben beide Alternativen aber auch gravierende Nachteile: Die Durchlichtaufnahme benötigt eine milchig-transparente Platte als Oberfläche des Übergabetischs, was infolge der Anforderungen an die Luftdurchlässigkeit der Unterlage (Anforderung 3) zum zügigen Anheben des Zuschnitts nicht machbar scheint. Die 0°/45°-Anordnung bringt mit sich, dass über dem Roboter die Beleuchtung und eventuell auch die Kamera so anzubringen ist, dass ein Schattenwurf des Roboters und des Greifers auf den Übergabetisch sowie Kollisionen mit Roboter und Greifer möglichst ausgeschlossen sind (Widerspruch zu Anforderung 1). Aus dieser Sichtweise spricht alles für die Montage von Kamera und Beleuchtungssystem am Greifer, idealerweise in einer kompakten Einheit. Im Sinne der späteren Industrietauglichkeit wurde die Entscheidung für dieses Konzept getroffen; Reflexionen werden über die Beleuchtung und Optik vermieden (siehe Abschnitt 3.1.3). Das Kamerasystem inklusive Beleuchtung wird gemäß Anforderung 1 direkt an dem am Roboter befindlichen Greifer befestigt, als Ausgangsbasis wird der Arbeitsabstand auf 1 m festgelegt. Zum Einsatz kommt je nach Anwendungsfall ein geeigneter, am DLR ZLP vorhandener Greifer.

Kamera

Durch die Anforderung 7 nach späterer Schwarz-auf-Schwarz-Detektion wurde als Kamera eine Prosilica GX 1920 Schwarzweißkamera mit Sony 2/3" CCD-Chip Typ ICX674 ExView HAD gewählt (Abb. 3.3 rechts). Der Chip ist Nachfolger des bekannten ICX285 AL, der in zahlreichen messtechnischen Anwendungen Verwendung findet, in denen es auf hohe Dynamik und exzellentes Signal-Rauschverhältnis ankommt und zeichnet sich wie sein Vorgänger durch hohe Quanteneffizienz (Abb. 3.3 links), extrem geringes Rauschen und verbessertes Anti-Blooming aus, wodurch eine Grauwertauflösung von 14 Bit erreicht wird. Der Chip bietet somit genügend Dynamik, um später beispielsweise auch den abgelegten Zuschnitt auf darunterliegenden Lagen detektieren zu können. Die Auflösung wurde gegenüber dem Vorgängermodell auf 1936 x 1456 Pixel gesteigert, was beim avisierten Arbeitsabstand ca. 0,9 mm pro Pixel entspricht. Dies erscheint gering hinsichtlich der geforderten Systemge-



1. Bildverarbeitungssystem mit integrierter Beleuchtung
2. Zuschnitt
3. Mechatronisches Handhabungssystem (Greifer)
4. Roboter
5. Aufnahmetisch

Abbildung 3.2: Systemlayout

naugigkeit (Anforderung 8), ist aber durchaus ausreichend, da die meisten Bildverarbeitungs-algorithmen auch Subpixel-Auflösung bieten. Je nach durch die Optik erreichte Auflösung und Lichtverhältnissen kommt eine höhere Auflösung des Sensorchips oft nicht zum Tragen, da nur eine größere Anzahl von kleineren, stärker verrauschten Pixeln, die keine genaueren Ortsinformationen enthalten, verarbeitet werden müssen. In Verbindung mit der Gigabit-Ethernetschnittstelle der Kamera ist eine für Roboterzellen hinreichend lange und mit üblicher Ausstattung kompatible Verkabelung möglich, der Auswerterechner kann also nahezu beliebig platziert werden.

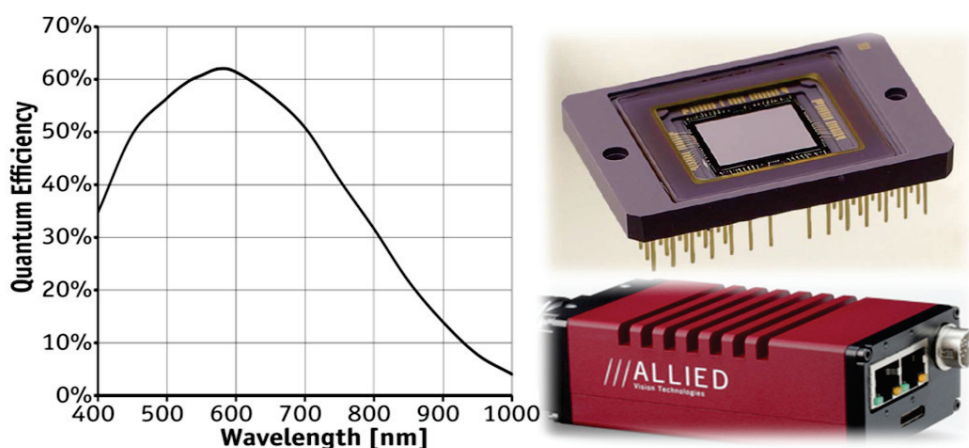


Abbildung 3.3: Auswahl von Kamera und Sensor

Beleuchtung

Bei der in 3.1.3 geometrischen Auslegung ist davon auszugehen, dass starke Probleme durch gerichtete Reflexion an der Zuschnittsoberfläche auftreten. Diese Störeinflüsse können durch die Verwendung von Polarisationsfiltern unterdrückt werden [13]: Die Beleuchtung, die in unmittelbarer Nähe des Kamerasystems angebracht ist, wird mit Polarisatoren jeweils gleicher Ausrichtung versehen. Vor die Kamera wird ein dazu um 90° gedrehter Polarisator als Analysator gesetzt (siehe auch Abbildung 3.6 im folgenden Abschnitt). Oberflächennahe Reflexionen erhalten die Polarisation und werden somit im Analysator ausgefiltert. Licht, das in das Material eindringt und wieder remittiert wird, hat hingegen eine zufällige Polarisation und kann den Analysator passieren. Reflexionen am Zuschnittsmaterial finden an der Schlichte und damit an der Oberfläche statt und werden somit je nach Güte der Polfilter um mehr als den Faktor 1000 geschwächt (Abbildung 3.4). Die Wahl fiel auf selbstklebende Polarisationsfilterfolie (ITOS, Modell XP42HE), die sich mit einer Dicke von 0,18 mm leicht auf eine vor der Beleuchtung befindliche Polycarbonatscheibe aufkleben lässt. Für den Analysator wurde ein weitwinkeltauglicher, SH-PMC geccoateter Slim-circular Polfilter der Firma Heliopan gewählt, der mit seiner zusätzlichen innenliegenden zirkular polarisierenden Schicht zur Vermeidung eventuell auftretender nachteiliger Effekte am Kamerachip beiträgt.

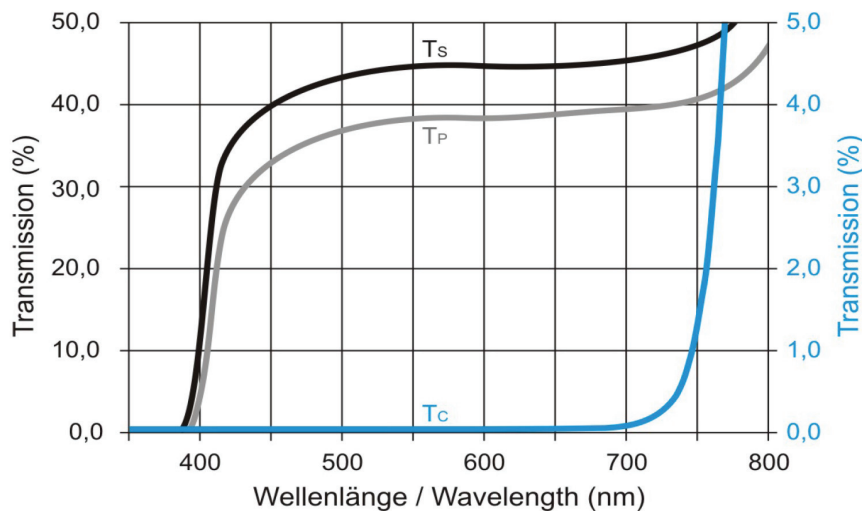


Abbildung 3.4: Spektrale Transmission Polfilter XP42 HE (Herstellerangaben)

Das unpolarisierte Umgebungslicht passiert den Analysator mit ca. 50% Intensität. Um vom Umgebungslicht unabhängig operieren zu können, muss die Beleuchtung wesentlich heller als dieses sein. Um thermische Lasten von der Kamera fernzuhalten (vgl. Anforderung 4), ist es notwendig, die Beleuchtung gepulst zu betreiben und so die eingetragene Wärme über den geringen Duty-Cycle zu minimieren. Dies kann mittels marktüblichen Blitzcontrollern in Kombination mit Hochleistungs-LEDs erfolgen. Als Blitzcontroller wurde der ethernetfähige, über Web-Interface konfigurierbare Gardasoft PP420F mit vier Ausgängen mit bis zu 10 Ampere Strom gewählt. Die Wahl bei den LEDs fiel auf die Cree XLAMP CXA2011, die in der Helligkeitsbin J0 bei einem Strom von 270 mA einen minimalen Lichtstrom von $\Phi_V=1040$ lm liefert. Wie aus Abbildung 3.5 ersichtlich kann dieser auf 300% erhöht werden, sofern man die LED mit einem im Pulsbetrieb unbedenklichen Strom von 1A betreibt. Insgesamt kommen 16 solche LEDs zum Einsatz, so dass sich rechnerisch ein Lichtstrom von 50000 lm ergibt. Bei einer ausgeleuchteten Fläche von geschätzt 4 m^2 entspricht dies inklusive Berücksichtigung der Abschwächung durch den vor der Beleuchtung liegenden Polfilter

mit der Formel

$$E_V = \frac{\partial \Phi_V}{\partial A} \quad (3.1)$$

aus [14] einer Beleuchtungsstärke von ca. 3100 lx, was deutlich über den für einen ständigen Arbeitsplatz vorgeschriebenen 300 lx liegt und somit hinreichend heller als das Umgebungslicht in Fertigungshallen sein sollte. Blitz und Kamera werden zur Aufnahme synchron getriggert.

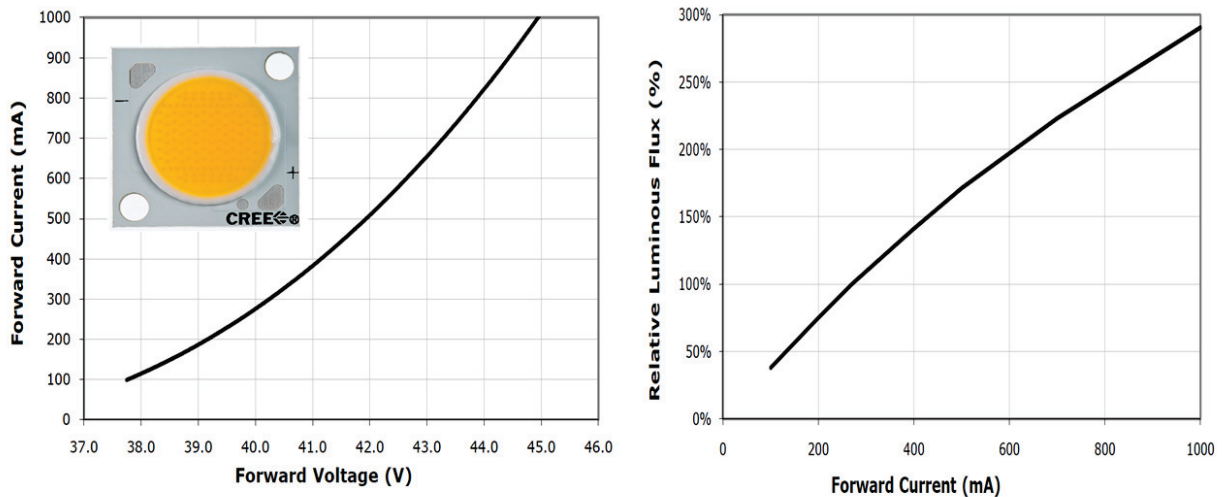


Abbildung 3.5: Charakteristik der ausgewählten LEDs Cree XLAMP CXA2011 (Herstellerangaben)

Optik

Aufgrund der Größe der Zuschnitte (Anforderung 5) ist ein möglichst weites Blickfeld zu wählen. Ausgehend von einer Nenngröße des Kamerachips von $2/3''$ (Chipgröße 8,8 x 6,6 mm)¹ ist die kürzeste verfügbare Brennweite in C-Mount in der Gegend von 4 mm. Als qualitativ hochwertiges Megapixel-Objektiv in diesem Bereich ist derzeit nur das Schneider-Kreuznach-Cinegon 1.8/4.8 (Brennweite 4,8 mm) verfügbar. In der genannten Konfiguration ergibt sich rechnerisch eine detektierbare Fläche von ca. 1800 x 1400 mm. Kürzere Brennweiten sind nur für kleinere Kamerachips verfügbar, wodurch die detektierbare Fläche nicht steigt. Objektive für größere Kamerachips hingegen haben längere Brennweiten, wodurch die detektierbare Fläche eher sinkt. Bei dieser kurzen Brennweite ist mit einer deutlichen Tonnenverzerrung zu rechnen, die über Software kompensiert werden muss. Der Umgang mit diesen weitreichenden Einschränkungen wird ausführlich in Abschnitt 3.2.1 behandelt.

Gesamtsystem

Bedingt durch die Gesamtheit der in Abschnitt 3.1.1 definierten Anforderungen ergibt sich zusammengefasst ein Systemlayout gemäß Abb. 3.6. Die in einem geschlossenen Alumini-

¹Bei der Zollangabe bei CCD- oder CMOS-Chips von Kameras handelt es sich trotz der aktuellen Gebräuchlichkeit um ein historisches Maß, das auf den Außendurchmesser der Bildaufnahmeröhren der ersten Fernsehkameras zurückgeht. Die Diagonale der aktiven Fläche betrug damals etwa $2/3$ des Außendurchmessers.

umgehäuse untergebrachte Kamera mit rauscharmem CCD-Sensor und 4,8 mm Objektiv (5) ist auf den Zuschnitt (4) gerichtet. Brennweite und Größe des Kamerachips sind so gewählt, dass sich die in Abschnitt 3.1.1 angegebenen Bildabmessungen im Abstand von 1 m ergeben. Dem Objektiv vorgesetzt ist ein Polfilter (3), der als Analysator für das von einer Blitzbeleuchtung (1) emittierte und durch einen Polarisator (2) polarisierte Licht fungiert.

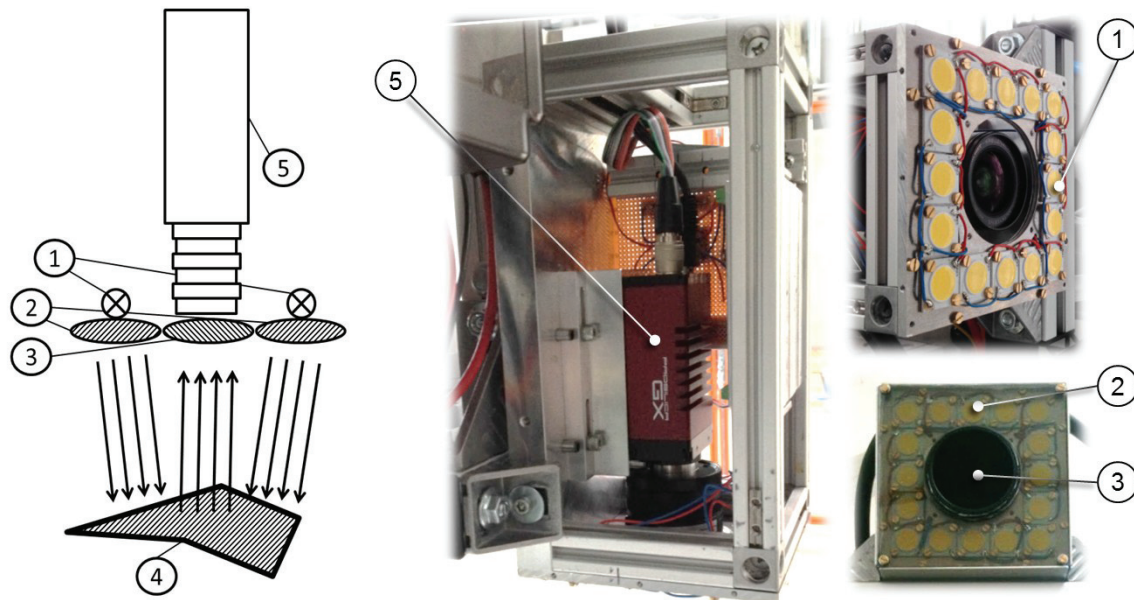


Abbildung 3.6: Kamerasystem bestehend aus Blitzbeleuchtung (1), Polarisator (2), Analysator (3) sowie Kamera mit Optik (5). Links unten ist schematisch der Zuschnitt (4) gezeigt.

Der Analysator wird so justiert, dass direkt an der Oberfläche polarisationserhaltend reflektiertes Licht ausgefiltert wird, wohingegen mehrfach gestreutes Licht, dessen Polarisation statistisch ist, passieren kann. Durch diese Anordnung wird jede gerichtete Reflexion, die durch die Blitzbeleuchtung entsteht, um etwa den Faktor 1000 reduziert, es bleiben lediglich geringfügige Reflexionen, die vom Umgebungslicht herrühren. Da die Blitzbeleuchtung sehr hell ist, können diese Reflexionen in Grenzen gehalten werden, sofern nicht Umgebungslicht direkt auf den Zuschnitt fällt. Eine derartige Anordnung zur Vermeidung von Reflexionen ist wie oben bereits gesagt beispielsweise in [13] beschrieben. Abbildung 3.7 zeigt den positiven Einfluss der gekreuzten Polfilter auf die Qualität des aufgenommenen Bildmaterials: Die in der linken Aufnahme dominanten Reflexionen können, wie rechts zu sehen, fast vollständig eliminiert werden. Dieser Sachverhalt lässt sich mittels Histogrammbildung auch quantitativ erfassen: Abbildung 3.8 zeigt die Grauwertistogramme der beiden Aufnahmen. Eigentlich sollte sich eine Mischung aus zwei Histogrammen für Zuschnitt und Hintergrund im Verhältnis der eingenommenen Flächen ausbilden. Im linken Histogramm zeigt sich deutlich, dass sich bei hohen (hellen) Grauwerten ein dritter Peak ausbildet, der durch die Reflexionen verursacht ist. Ebenso trennen sich die Peaks für Zuschnitt und Hintergrund nicht vollständig. Eine deutliche Verbesserung zeigt sich im rechten Histogramm der Aufnahme mit Polfiltern. Der Reflexions-Peak verschwindet vollständig, die beiden Peaks von Zuschnitt und Hintergrund nehmen um 50% an Intensität zu und die Trennung zwischen beiden verbessert sich signifikant: das Minimum beträgt nun nur noch 30 statt 250 Counts. Diese nun vorhandene Trennung der beiden Bildelemente ermöglicht es, Zuschnitt und Hintergrund sicher zu separieren und mit geeigneten Algorithmen auszuwerten.

Der Reflexions-Peak verschwindet vollständig, die beiden Peaks von Zuschnitt und Hintergrund nehmen um 50% an Intensität zu und die Trennung zwischen beiden verbessert sich signifikant: das Minimum beträgt nun nur noch 30 statt 250 Counts. Diese nun vorhandene Trennung der beiden Bildelemente ermöglicht es, Zuschnitt und Hintergrund sicher zu separieren und mit geeigneten Algorithmen auszuwerten.

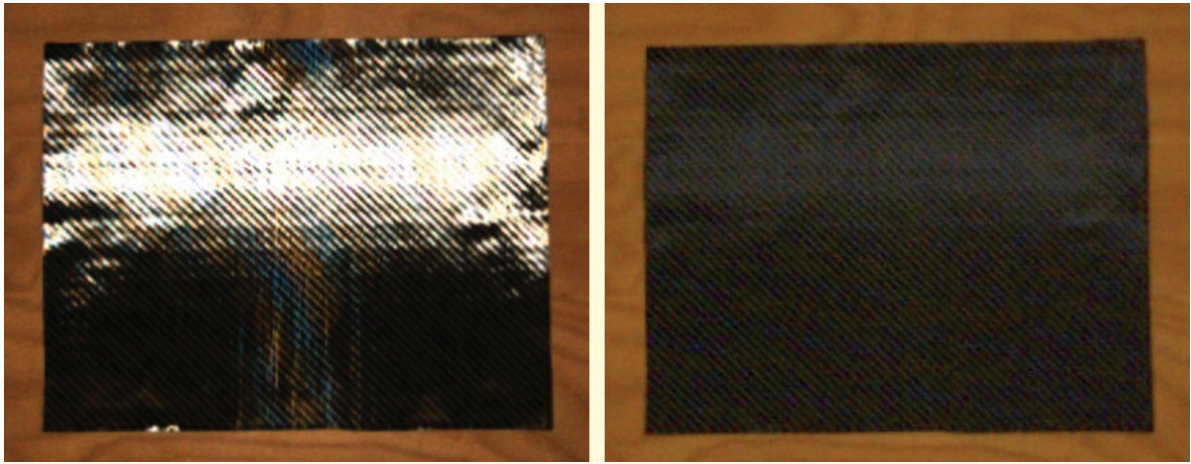


Abbildung 3.7: Zum Effekt der Polfilter: Links Aufnahme ohne Polfilter, rechts mit gekreuzten Polfiltern

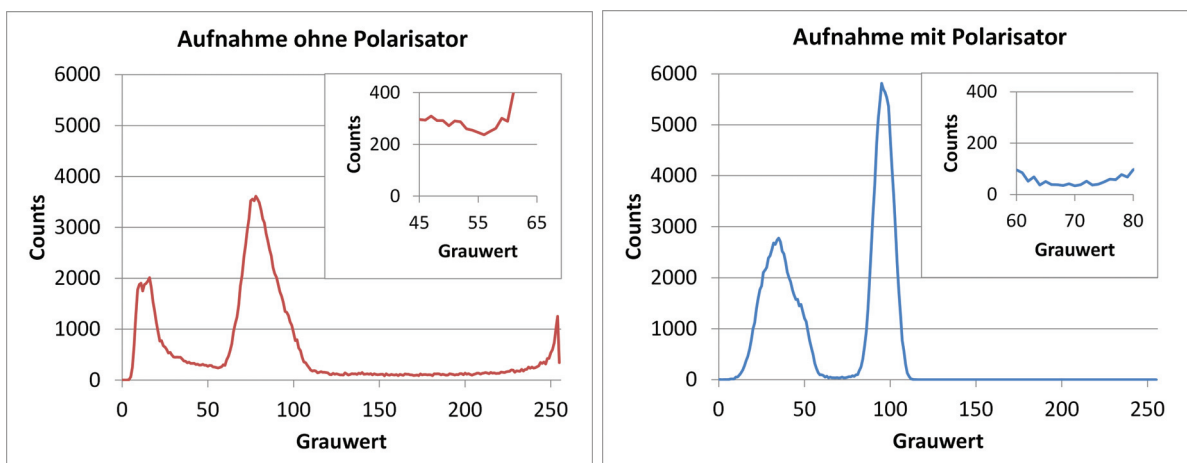


Abbildung 3.8: Verdeutlichung der Wirkung der Polfilter: Grauwert-Histogramme ohne und mit Polfilter

Es ergibt sich final das in Abb. 3.9 dargestellte, am Greifer montierte Gesamtsystem. Eine kompakte Einheit von 130x120x250 mm Abmessung mit zwei Anschlusskabeln für Spannung (48V) und Netzwerk. Der hier gezeigte Greifer kam als erster Prototyp zum Ablegen von Zuschnitten zum Einsatz und konnte hier sowohl für die Systemtests (Abschnitt 3.4) als auch für den Use-Case der Stringerbase-Preforms (Abschnitt 4.3) verwendet werden.

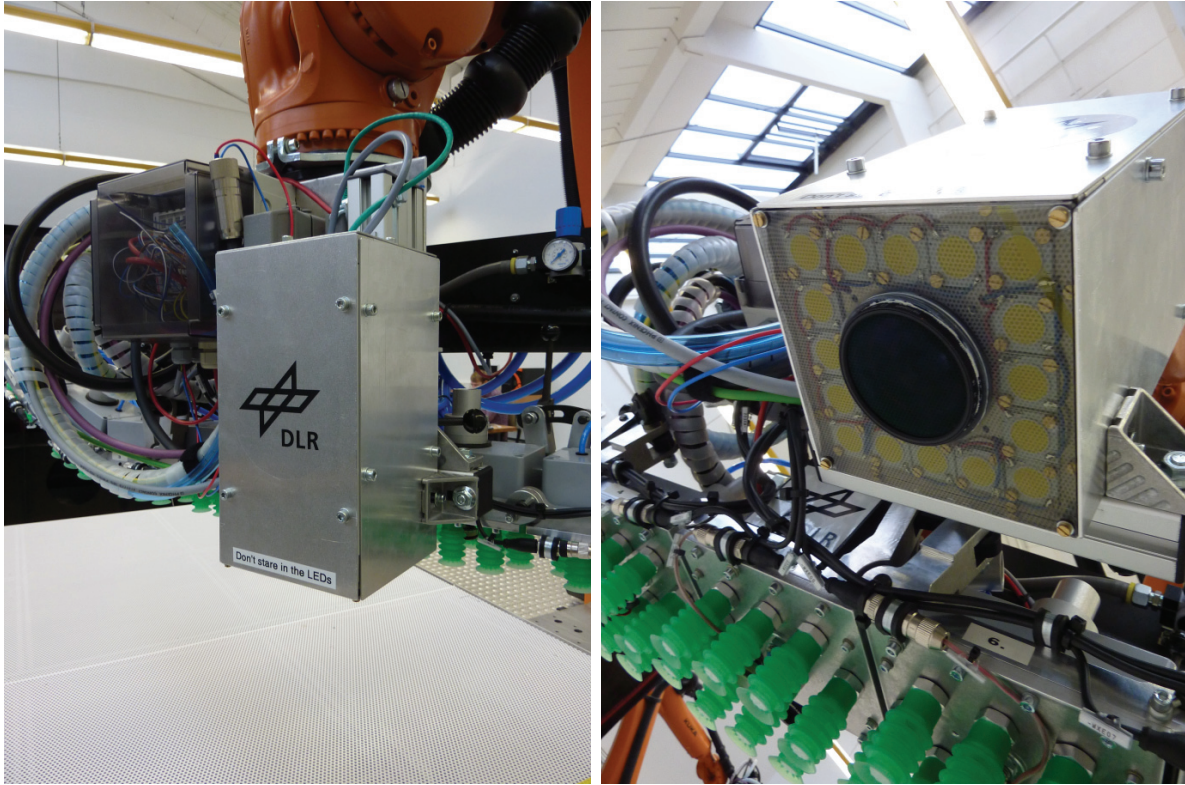


Abbildung 3.9: Fertiggestelltes Gesamtsystem am Greifer montiert

3.1.4 Algorithmen zur Zuschnittserkennung

Verwendete Software

Aufgrund der großen Menge der verfügbaren Algorithmen aus teilweise neuesten Forschungsergebnissen, der hohen Geschwindigkeit, der umfangreichen Funktionen zur Kamerakalibrierung, der Lizenzkostenfreiheit sowie der Cross-Platform Kompatibilität wird die Bibliothek OpenCV ab der Version 2.1 bis 2.4.11 [15] verwendet. In OpenCV existieren Bindings für C, C++ und Python, auch gibt es einen C#-Wrapper, der einige Versionen hinter der Zeit ist. Aufgrund der direkten Verknüpfung mit hardwarenahen Systemen zur Bildakquise, der engen Anforderungen an die Laufzeit und der späteren Portabilität wurde als Programmiersprache C++ gewählt.

Verfahrensauswahl

Die digitale Bildverarbeitung bietet zahlreiche Methoden, um Form und Position von Objekten in digital vorliegenden Bildern zu bestimmen. Besonders auffällige und stabile Merkmale im Bildmaterial lassen sich beispielsweise mit Interest-Operatoren [16, 17, 18] ermitteln. Bei diesen als Feature Detection bzw. Merkmalerkennung bekannten Methoden wird versucht, im Bildmaterial besonders auffällige Stellen (sog. Salient Points) wie z. B. besonders kontrastreiche Kanten und Ecken zu ermitteln, auch kann je nach Einsatzzweck die Invarianz gegenüber Translation, Rotation oder Skalierung eine Rolle spielen [19]. Gängige Anwendungsfälle sind Objektverfolgung (Object Tracking) oder Zusammenfügen von Bildern (Stitching), denn die Salient Points lassen sich, sofern sie eindeutig genug sind, in unterschiedlichen Bildern leicht wiederfinden und gestatten eine Positionsbestimmung von praktisch beliebig gearteten Objekten.

Aufgabe im betrachteten Kontext ist die Erkennung der Zuschnittsbegrenzung im Bildmaterial ohne Kenntnis der Materialspezifikation, d. h. die sichere Detektion von Kanten und Ecken des Zuschnitts unabhängig vom Material. Die detektierten Punkte, die auch durchaus andere Relativpositionen auf der Kontur haben können, müssen dann in einem weiteren Schritt mit den Solldaten aus dem Plybook abgeglichen werden (Abb. 3.10), beispielsweise mit dafür besonders geeigneten Matching-Verfahren [20].

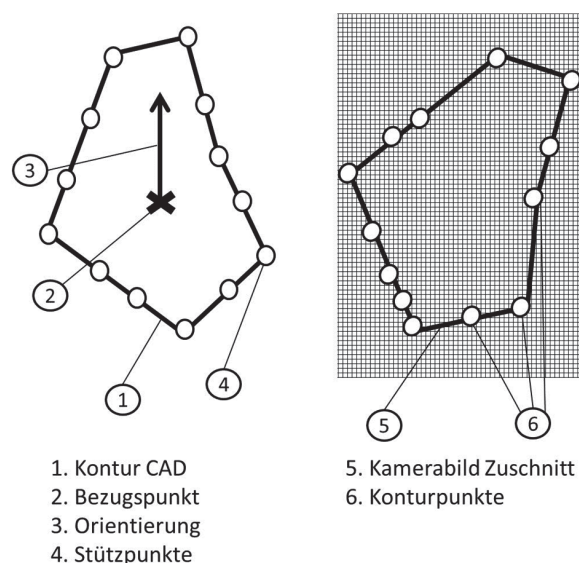


Abbildung 3.10: Vorgehensweise beim Konturvergleich

Bei den eben genannten Verfahren werden signifikante Helligkeitssprünge detektiert und hinsichtlich der Ähnlichkeit mit der Umgebung bewertet. Da sich Kanten deutlich mehr von ihrer Umgebung unterscheiden als Stellen einheitlicher Struktur wurde die Feature-Detektion als mögliches Verfahren untersucht. Es wurden zunächst Vortests mit dem Harris-Detektor [16] durchgeführt, bei denen sich neben eines starken Einflusses des verwendeten Zuschnittsmaterials eine starke Neigung zur Detektion der Löcher des Aufnahmetischs anstatt der Zuschnittskanten sowie die Detektion von materialeigenen Strukturen mitten im Zuschnitt zeigte. Die Variation der Detektorparameter und Vorbehandlung des Bildes durch kantenerhaltendes Glätten mit einem Median-Filter führte nicht zur gewünschten Stabilitätssteigerung. Interessanterweise funktionierten die genannten Verfahren problemlos, wenn sie nur auf den digitalen Datenbestand angewendet werden. Dies demonstriert wiederum eindrücklich die Abstraktionsleistung des menschlichen Gehirns beim Sehprozess und die in der maschinellen Bildverarbeitung oft angetroffenen Schwierigkeiten bei der Arbeit in einem realen Umfeld. Die alternativen Verfahren der Feature Detection nach Moravec [17] und SUSAN [18] wurden nicht mehr näher untersucht, da ähnliche strukturinduzierte Probleme zu erwarten sind. Weitere Verfahren zur Detektion von Kanten [21, 22] zeigten in den Voruntersuchungen Instabilitäten bei der Behandlung von CFK-Zuschnitten, die teils auf Reflexionen, teils auf ausgefaserte Materialränder zurückzuführen waren. Als ebenso schwierig wie bei der Feature-Detektion erwiesen sich das Ignorieren der Belüftungslöcher des vorgegebenen Aufnahmetischs - hierbei ergeben sich entweder Fehlstellen in der gewünschten Kontur oder aber tausende unerwünschte Konturen, die den Kantenverfolgungsalgorithmus von Suzuki [21] hinsichtlich der Laufzeit von mehreren Minuten unverwendbar machen.

Aufgrund dieser Vortests wurde mit guten Ergebnissen das Verfahren der normierten Kreuzkorrelation [23, 24] verwendet, das ein integrales und robustes Verfahren zum Bildvergleich auch bei schwierigen Umgebungsbedingungen ist. Abb. 3.11 veranschaulicht das Verfahren.

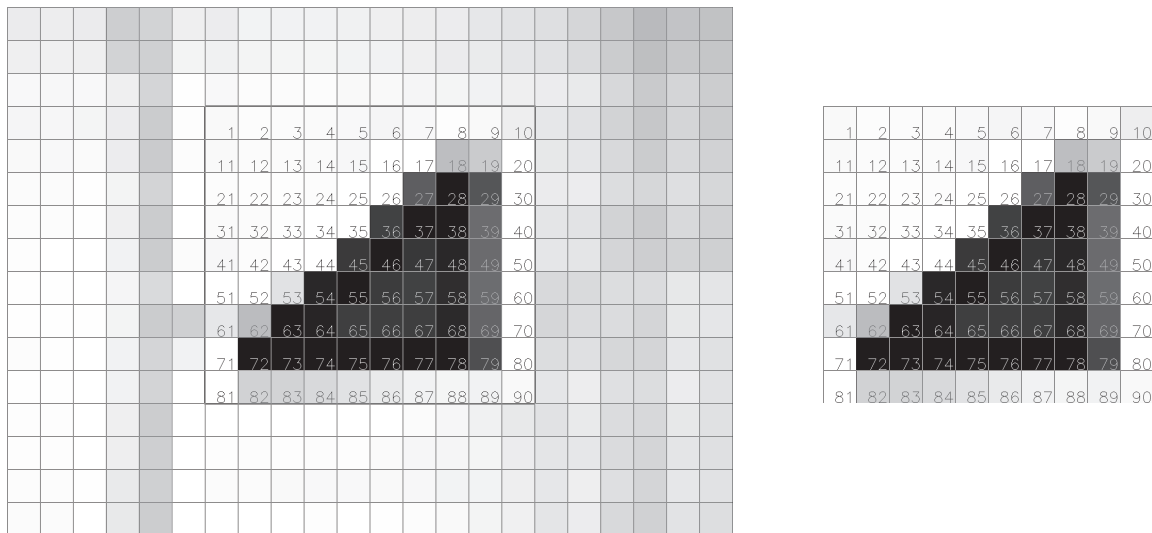


Abbildung 3.11: Vorgehen beim Template Matching. Links das Gesamtbild \hat{A} mit einem Suchausschnitt A, rechts das zu detektierende Muster B (Template). Die Nummerierung der Pixel entspricht dem Laufindex in Gleichung 3.3.

Das Bild B (Anzahl Pixel= n) soll in einem größeren Bild \hat{A} gesucht werden. Man ermittelt nun für jeden möglichen Bildausschnitt A des großen Bildes den Korrelationskoeffizienten c .

Dieser berechnet sich aus Kovarianz v und den jeweiligen Standardabweichungen gemäß

$$c = \frac{v(A, B)}{\sigma_A \sigma_B} \quad (3.2)$$

$$v(A, B) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - \mu_A)(B_i - \mu_B) \quad (3.3)$$

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - \mu_A)^2} \quad , \quad \sigma_B = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (B_i - \mu_B)^2} \quad (3.4)$$

$$\mu_A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i \quad , \quad \mu_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_i \quad (3.5)$$

Durch den Abzug der Mittelwerte $\mu_{A/B}$ und die Division der Standardabweichungen $\sigma_{A/B}$ können unterschiedlich belichtete Aufnahmen ebenso miteinander verglichen werden wie ein digitales Sollbild mit einer realen Aufnahme. Der Bildausschnitt A mit dem größten Korrelationswert c wird als richtig angenommen. Die Genauigkeit der Lagedetektion des Bildausschnitts A kann durch Subpixel-Techniken verbessert werden [24]. Wendet man das Verfahren für alle möglichen Rotationen von B um sein Zentrum an, erhält man auch den benötigten Drehwinkel. Das Verfahren ist robust gegen Helligkeitsschwankungen, Reflexionen und kleinere Abweichungen der Geometrie. Wie in Abschnitt 3.2.3 gezeigt werden wird, ist dies nicht nur ein Vorteil, da falsch positive Detektionen bei geometrisch ähnlichen Zuschnitte mit extrem hoher Sicherheit auszuschließen sind (vgl. Anforderung 6). Auch ist der Template Matcher nicht in der Lage, Zuschnitte mit Rotationssymmetrien wie regelmäßige n-Ecke oder Kreise zu unterscheiden. Hierfür müssen zusätzliche Verfahren angewendet werden, wie in Abschnitt 3.2.4 diskutiert wird.

Template Matching und Transparenz

Ein wesentlicher Nachteil des Template Matchings ist, dass nur rechteckige Templates gesucht werden können. Da die Zuschnittslage beliebig ist, kann ein verdrehter Zuschnitt ein umgebendes Rechteck haben, das erheblich größer ist als der Zuschnitt selbst. Dieses Rechteck muss mit Hintergrund ergänzt werden. Nun ist es sehr gut möglich, dass im eigentlich uninteressanten Bereich des umgebenden Rechtecks nun aber kein freier Tisch, sondern bereits der nächste Zuschnitt liegt. Da Template Matcher keine Unterscheidung zwischen Vorder- und Hintergrund machen, sinkt der Wert für die Kovarianz v aus Gleichung 3.3 und damit der Korrelationswert in diesem Bereich ab. Ein solcher Zuschnitt kann nicht mehr sicher erkannt werden bzw. wird im schlimmsten Fall sogar verwechselt. Abhilfe schafft die Einführung einer transparenten Farbe im Template, für die schlicht die Summation in Gleichung 3.3 ausgesetzt wird (ebenso ist dann die Pixelzahl n zu reduzieren). Leider können die Template Matcher der gängigsten Bildverarbeitungsbibliotheken nicht mit einer transparenten Farbe umgehen, und da sich bei einer umfangreichen Internet-Recherche auch sonst keine verfügbare Implementierung fand, wurde der Template Matcher selbst implementiert. Gleichungen 3.2 bis 3.5 sind zwar schnell hingeschrieben und auch die Implementierung der transparenten Farbe gelingt leicht, doch treten starke Probleme mit der Laufzeit auf.

Laufzeitbetrachtung

Eine straight-forward Implementierung gemäß der Gleichungen 3.2 bis 3.5 zieht vier ineinander geschachtelte Schleifen nach sich, da ja das zweidimensionale Template für jede mögliche Position in einem zweidimensionalen Suchbild durchzumultiplizieren ist. Sei das Template o. B. d. A. quadratisch und (mit $\tilde{n} = \sqrt{n}$) $\tilde{n} \times \tilde{n}$ Pixel groß; das Suchbild sei um den Faktor α in beiden Richtungen größer. Es sind dann für die Kovarianz $\approx \tilde{n}^2(\alpha\tilde{n} - \tilde{n} - 1)^2 = \dots = (\alpha - 1)^2\tilde{n}^4 + 2(\alpha - 1)\tilde{n}^3 + \tilde{n}^2$ Multiplikationen durchzuführen und der Algorithmus hat somit eine Komplexität von $\mathcal{O}(\tilde{n}^4)$ bzw. mit der Pixelzahl n aus Gleichung 3.3 $\mathcal{O}(n^2)$ und wird damit gerade bei größeren Bildern extrem langsam. Gute Bildverarbeitungsbibliotheken nutzen den Faltungssatz, der eine Faltung im Ortsraum auf eine Multiplikation im Fourierraum zurückführt (zum Thema Fouriertransformation siehe Abschnitt 3.2.4). Die Fouriertransformation hat eine Komplexität von $\mathcal{O}(n \log n)$ und ist somit bei größeren Bildern deutlich besser konditioniert, aber: man kann nicht einfach einzelne transparente Pixel bei der Faltung übergehen, da ja im Frequenzraum nur multipliziert wird. Folglich muss man versuchen, die Rechenzeit an anderer Stelle einzusparen, sofern es nicht gelingt, durch einen mathematischen Kunstgriff im Fourierraum operieren zu können. Setzt man z. B. alle transparenten Pixel des Templates auf den Mittelwert der nichttransparenten Pixel, so tragen diese nicht mehr zur Kovarianz aus Gleichung 3.3 bei, da der erste Faktor in der Summe Null wird, die Pixelzahl n ist dann mit einem Faktor entsprechend zu korrigieren, ebenso die Standardabweichung σ_B in Gleichung 3.4. Das Verfahren eignet sich gut dazu, ein vorhandenes Template mit transparentem Hintergrund zu finden, bereitet aber Schwierigkeiten beim Vergleich von realen mit digitalen Daten, da in Gleichung 3.4 die Standardabweichung σ_A des Bildausschnitts des Suchbilds nicht beeinflusst und somit die Transparenz nicht berücksichtigt werden kann. Somit scheidet die Recheneinsparung durch Faltung sowie die Verwendung schneller Bibliotheken, wie z. B. für Korrelationsberechnungen auf der Grafikkarte (CUDA Development Kit), zunächst aus.

Da nach eingehender Betrachtung keine Lösung erkennbar war, wurde auf die Nutzung der Faltung verzichtet und der Code für die normierte Kreuzkorrelation im Ortsraum optimiert. Multipliziert man die Summanden in Gleichung 3.3 und 3.4 aus und stellt geeignet um, so können in einem Durchlauf sämtliche Summen für Mittelwerte, Standardabweichungen und Kovarianz berechnet werden, was reine Ganzzahlarithmetik ist. Rechenintensives Dividieren und Wurzelziehen geschieht nur einmal pro Bildausschnitt. Im nächsten Optimierungsschritt können die Eingangsdaten in einer sog. Bildpyramide in der Auflösung immer weiter reduziert werden, so dass eine grobe Positionsbestimmung nur auf kleinen Datenmengen stattfindet, wohingegen die genaue Berechnung nun nur noch in einer kleinen Umgebung der in der Bildpyramide gefundenen Position geschehen muss. Bezüglich der Winkelstellung, wo ja eine sehr hohe Auflösung benötigt wird, kann zunächst in einem groben Winkelraster gearbeitet werden, das für die besten Übereinstimmungen schrittweise weiter verfeinert wird. Last but not least ist es möglich mittels geeigneter Bibliotheken wie z. B. Open MP sämtliche Prozessorkerne parallel zu nutzen und die Rechenleistung hochzuskalieren. Nimmt man all diese Schritte zusammen, so gelingt es mit einem Intel Core I7 mit acht Kernen und drei GHz Taktung Zuschnitte von 300 mm Länge in ≈ 1 s, doppelt so große Zuschnitte in ≈ 4 s zu detektieren. Hinsichtlich der Verarbeitung von sehr großen Zuschnitten besteht also weiterhin Optimierungsbedarf. Neben der eben genannten Nutzung des Faltungssatzes könnte die in einer studentischen Arbeit am DLR [25] untersuchte Ringsummation oder aber die Berechnung der rotationsinvarianten Hu-Momente [26], implementiert in Open-CV, eine erste Positionsabschätzung für den Template Matcher liefern und so die Komplexität reduzieren helfen. Das erste Verfahren erwies sich indes als ungeeignet um mit Transparenz umzugehen,

das zweite setzt eine stabile Konturdetektion voraus, die im vorherigen Abschnitt aufgrund von nicht gänzlich unterdrückten Reflexionen und des störenden Einflusses der Belüftungslöcher in der Tischplatte als nicht praktikabel verworfen wurde. Neuen Auftrieb könnten diese Verfahren erhalten, sofern es gelingt die Bildakquise vollständig vom Umgebungslicht zu entkoppeln; hierzu laufen aktuell Tests mit monochromen LEDs und Bandpassfiltern.

3.1.5 Kommunikation mit dem Roboter

Die in Abschnitt 3.1.1 in Punkt 9 definierten Anforderungen an ein autonomes System bedingen die Notwendigkeit zumindest einer einfachen, prototypischen Prozessplanung sowie eines ebenso minimalistischen Produktionsleitsystems. Da die speziell auf ihren Einsatzzweck zugeschnittene Robotersteuerung (KUKA KRC4) mit ihrer nativen Sprache KRL für diesen Zweck nicht ausdrucksstark² genug ist, bleibt sinnvollerweise nur die Implementierung auf einem besser geeigneten, externen System, das mit der Robotersteuerung kommuniziert. Mögliche Kommunikationsarten sind in Abb. 3.12 aufgezeigt, man muss nun aus der gebotenen Vielfalt den geeignetsten Modus auswählen.

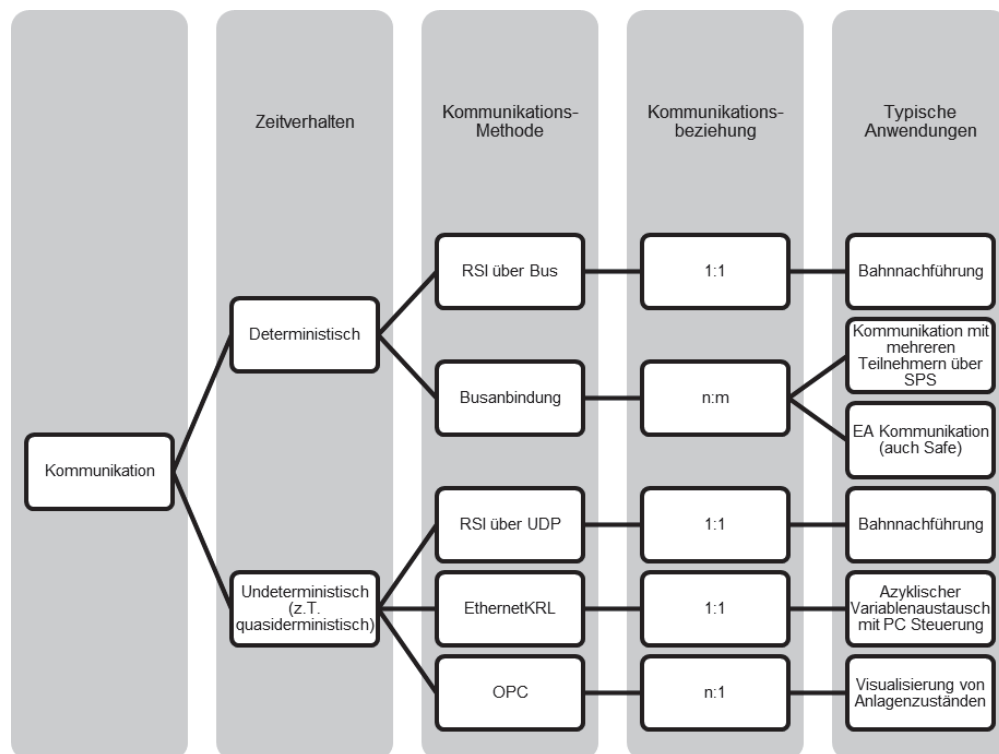


Abbildung 3.12: Kommunikationsmöglichkeiten mit der Robotersteuerung nach [27]

Da keine Echtzeitanforderung besteht genügt es, den unteren Zweig zu betrachten. Obwohl laut [27] das RSI³-Protokoll über UDP⁴ nur als quasideterministisch eingestuft wird, bedingt es doch den zyklischen Austausch von Datenpaketen im 4 ms-Raster und wird hier

²Die für diesen Zweck notwendigen Konstrukte sind, ungeachtet dessen, dass KRL als Turing-vollständig anzusehen ist, einfacher und vor allem verständlicher in einer Sprache implementierbar, die ein höheres Abstraktionsniveau gestattet.

³Remote Sensor Interface, KUKA Technologiepaket für Integration von Sensorik, siehe [28]

⁴User Datagram Protocol, verbindungsloses Ethernet-Netzwerkprotokoll zum Austausch von Datenpaketen, die im Fehlerfall nicht erneut gesendet werden, z. B. weil sie veraltet sind [29].

für die auszuführenden Aufgabe nicht benötigt. Möchte man auf das Aufsetzen eines OPC⁵-Servers, der seine eigenen speziellen Aspekte mit sich bringt, verzichten, ist der präferierte und einfachste Weg die Verwendung des KUKA-Technologie-Pakets Ethernet-KRL [31]. Dieses Paket gestattet im laufenden KRL-Programm den direkten Austausch beliebiger Daten mit der Robotersteuerung über die Ethernet-Protokolle TCP/IP⁶ oder UDP.

3.1.6 Ablaufsteuerung und Systemarchitektur

Für das System zum autonomen Greifen ist es sinnvoll, den Roboter als sog. Slave zu betreiben, d. h. alle Roboterbewegungen werden von außen PC-basiert angestoßen, der Roboter wird quasi ferngesteuert. Ein Masterprogramm zur Ablaufsteuerung übernimmt die Koordinierung der Arbeitsschritte zwischen Bildverarbeitungssystem und Robotersteuerung, der Einfachheit halber kann es ohne Beschränkung der Aussage zunächst auf dem Bildverarbeitungsrechner laufen. Die Ablaufsteuerung hat Kenntnis über die auszuführenden Arbeitsschritte und besitzt alle dafür benötigten Daten (vgl. Abschnitt 3.5). Das Kernsystem kann also aussehen wie in Abb. 3.13 gezeigt:

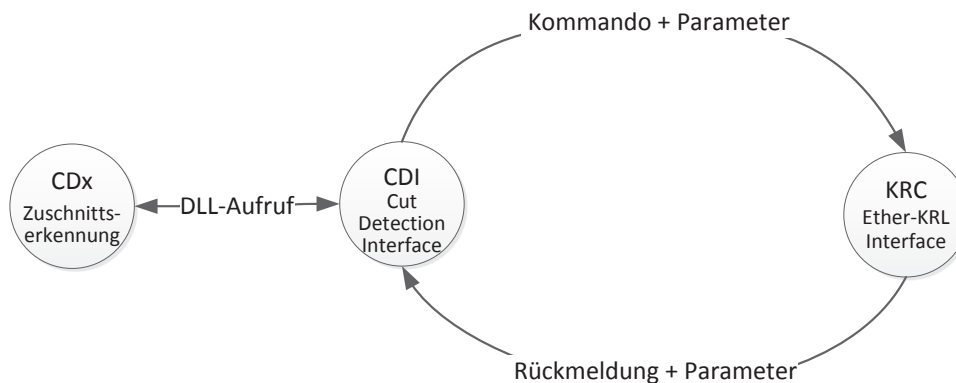


Abbildung 3.13: Auslegung des Kernsystems

Das Masterprogramm, hier CDI genannt, ist der Ethernet-KRL-Master, die Robotersteuerung (KRC4) fungiert als Slave. Über die eingangs hergestellte TCP/IP-Verbindung läuft die Kommunikation über Handshake mit einem minimalen vorher festgelegten Kommandosatz ab. Dabei wird vom Master der Kommandoname sowie eventuelle Nutzdaten als Zeichenkette an den Slave gesendet; dieser quittiert anschließend die erfolgreiche Ausführung des Kommandos. Der Kommandosatz ist jederzeit erweiterbar; für die ersten Versuche genügten folgende sechs Kommandos:

- `bool MOVE_FAST(frame pos)`: Schnelle Bewegung zur Position pos zum Vorpositionieren.
- `bool MOVE_SLOW(frame pos)`: Langsame Bewegung zur Position pos zum finalen, sanften Anfahren der Endposition.

⁵OLE for Process Control (OLE steht für Object Link Embedded), Verfahren zum hardwareunabhängigen Datenaustausch [30].

⁶Transmission Control Protocol / Internet Protocol, verbindungsorientiertes Ethernet-Netzwerkprotokoll zum sicheren Austausch von Daten. Das Protokoll stellt das Eintreffen der Datenpakete sicher, indem ggf. die Übermittlung wiederholt wird [32].

- `bool GRIPPER_CFG(int gripperbits)`: Festlegen der aktiven Wirkflächen beim Greifvorgang.
- `bool GRIPPER_ON(void)`: Aktivieren der konfigurierten Wirkflächen.
- `bool GRIPPER_OFF(void)`: Deaktivieren der Wirkflächen.
- `frame QUERY_POS(void)`: Positionsankunft.

Die Datenstruktur **frame** steht hierbei für eine kartesische Roboterposition aus Ort und Eulerwinkeln in einem voreingestellten Basiskoordinatensystem [33] und ist definiert als **STRUC FRAME REAL X,Y,Z,A,B,C**. Das KRL Hauptprogramm wartet in einer Endlosschleife auf vom Master eintreffende Kommandos. Sobald ein gültiges Kommando empfangen wird, wird auf die passende Codestelle verzweigt und z. B. ein Bewegungssatz ausgeführt (Abb. 3.14).

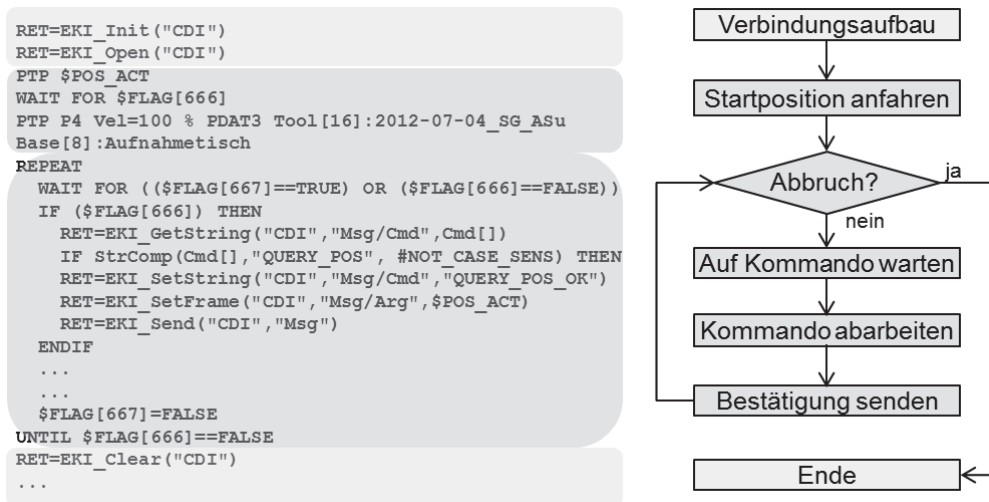


Abbildung 3.14: Illustration der Abläufe im KRL-Programm (Slave)

Da das System keinerlei Kenntnis über wie auch immer geartete Störkonturen hat und immer den kürzesten Weg zwischen zwei Punkten nimmt, ist es essentiell z. B. durch geeignete Geometriewahl sicherzustellen, dass von der Aufnahme-position aus alle möglichen Greif- und Ablageorte kollisionsfrei angefahren werden können.

Bereits mit diesem minimalen Kommandosatz ist es möglich, einfache Aufgaben wie das Erstellen von endkonturnahen Organoblechen abzudecken. Wichtig ist es, in der Systemarchitektur ab initio eine strikte Trennung der Systeme einzuhalten und kein ungeeignetes System zu überfrachten (vgl. 3.1.5). Beschreitet man diesen Weg weiter und standardisiert die Kommunikationsprotokolle zumindest in gewissem Rahmen, ergibt sich eine offene Systemarchitektur für die Parametrisierung und Ausführung von Produktionsabläufen. Zu einem späteren Zeitpunkt können beliebige weitere Teilnehmer zum System hinzukommen, da es sich um standardisierte TCP/IP-Kommunikation handelt. Ein System mit erweiterten Fähigkeiten könnte in dieser offenen Architektur wie in Abb. 3.15 gestaltet werden.

Das aus dem CAD stammende Plybook, das die Zuschnittskonturen in 2D und 3D enthält, wird mittels eines Produktionsplanungssystems sowie eines Greif- und Heftplanungsmoduls um produktionstechnisch relevante Metainformationen ergänzt. Neben der Menge der möglichen bzw. erlaubten Ablegereihenfolgen, der optimalen Positionierung des Greifers für alle

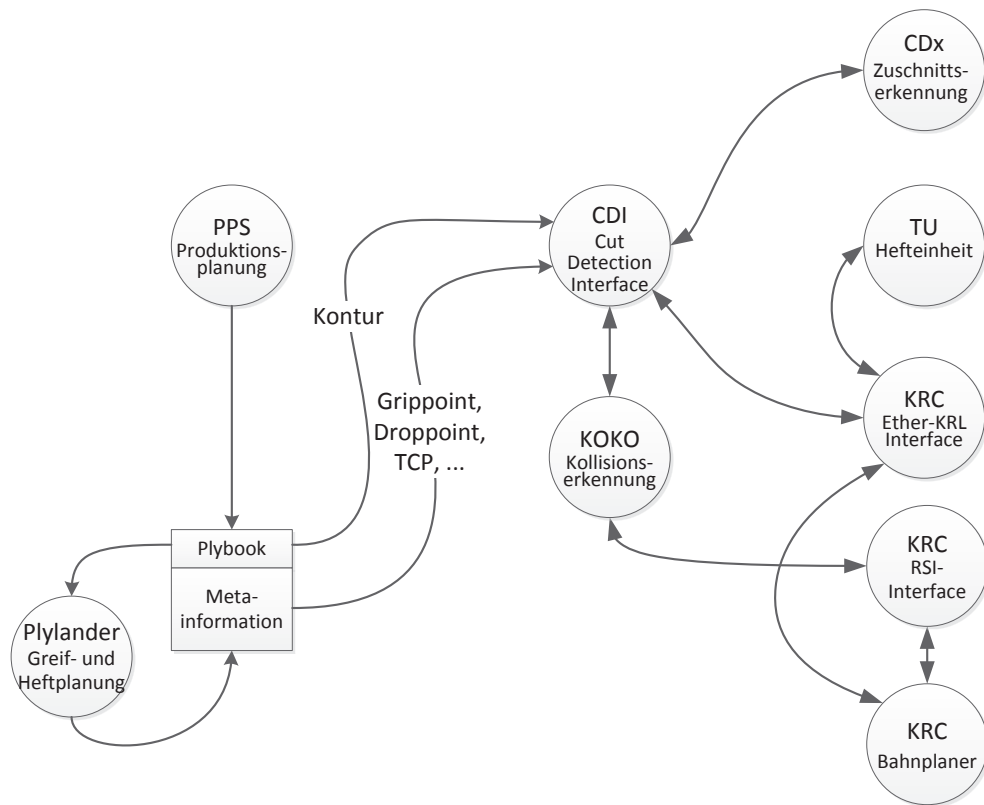


Abbildung 3.15: Mögliche Systemarchitektur für ein erweitertes System

Zuschnitte und der Lage der diesbezüglichen Heftpunkte müssen auch Informationen über die mit der Aufnahme position korrespondierenden 3D-Ablagepunkte ermittelt werden. Eine ausführliche Betrachtung zu diesen für Greifen und Ablegen benötigten Metadaten findet sich in Abschnitt 3.5. Plybook und Metainformationen werden vom CDI-System verarbeitet, das CDI kommuniziert mit Robotersteuerung, Zuschnittserkennung und Heftmodul, in diesem Entwurf ist auch ein Kollisionserkennungsmodul integriert, das über RSI mit der KRC kommuniziert [34] und dem System gestattet, auf dem direkten Weg liegenden Hindernissen auszuweichen. Dies kann für komplexere Anwendungsfälle mit komplexen Ablagegeometrien oder der Ablage mit kooperierenden Robotern besonders wichtig werden.

3.2 Validierung des Bildverarbeitungssystems

3.2.1 Kalibrierung des Kamerasystems und erzielbare Genauigkeit

Das Systemlayout gemäß Anforderung 5 auf S. 18 stellt hohe Anforderungen an die verwendete Optik: bei einem Arbeitsabstand von 1 m ergibt sich eine Bilddiagonale von ca. 3 m. Durch die dafür nötige, sehr kurze Brennweite der Optik ergeben sich starke Verzerrungen und es werden weitreichende geometrische Korrekturen am von der Kamera aufgenommenen Bildmaterial nötig (Abb. 3.16).

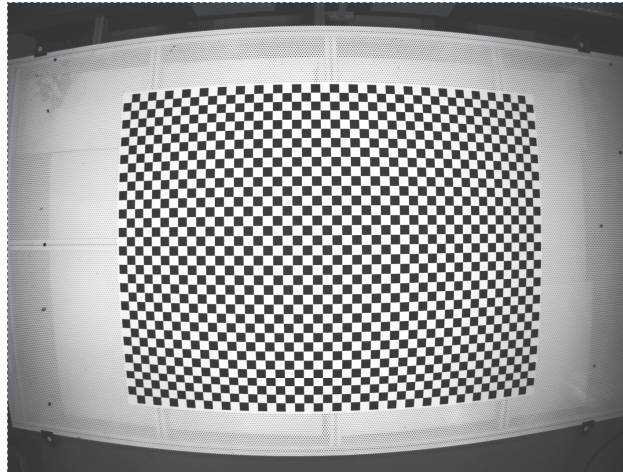


Abbildung 3.16: Zum Ausmaß der benötigten Bildkorrekturen

In [35] ist ein Verfahren beschrieben, das anhand der Aufnahme von Schachbrettmustern die Verzerrungen einer Kameraoptik korrigieren kann. Dabei sind radiale Verzerrungen durch die Optik selbst und tangentiale Verzerrungen durch nicht-ideale Montage der Optik zu berücksichtigen [36, 37]. Wir nutzen hier die Implementierung von Zhangs Algorithmus aus OpenCV [15]; die korrekte experimentelle Herangehensweise ist in [38] beschrieben. Der Kamera werden dabei Schachbrettmuster in unterschiedlichen Aufnahmewinkeln und -abständen präsentiert. Die Lage der Eckpunkte wird mittels Subpixel-Techniken hochgenau bestimmt ([39], Abb. 3.17) und die Punkte der Auswertung zugeführt.

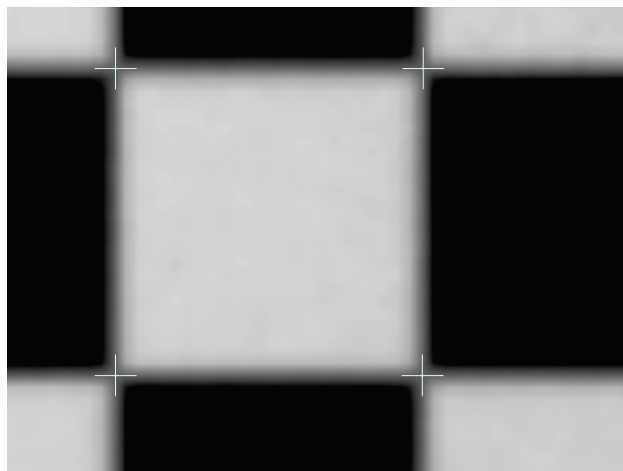


Abbildung 3.17: Detektion der Eckpunkte mit Subpixel-Genauigkeit nach [39]

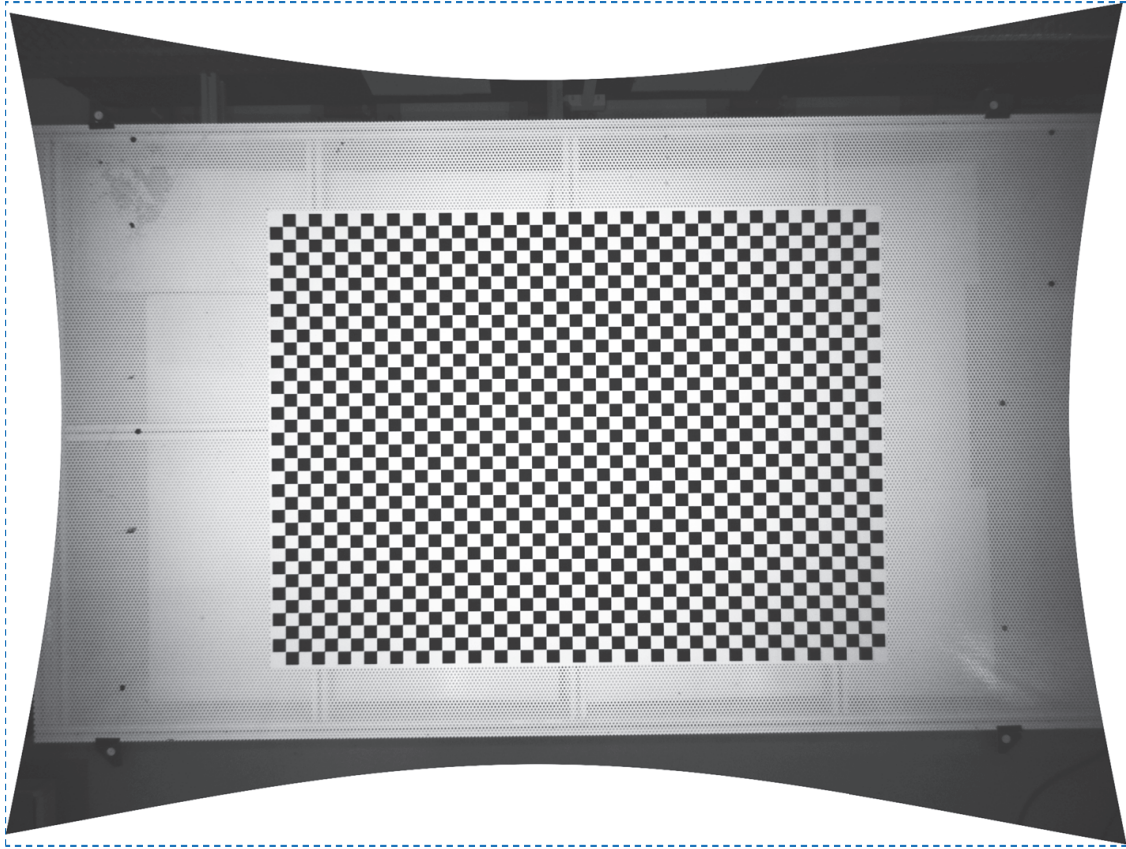


Abbildung 3.18: Mit dem Algorithmus nach Zhang entzerrtes Bild

Der Algorithmus kann nun lediglich aufgrund der Tatsache, dass die Eckpunkte horizontal oder vertikal benachbarter Quadrate auf Geraden liegen, eine Schätzung der Verzerrungen vornehmen. Die lokalen Verschiebungen im Punkt (\hat{x}, \hat{y}) des Ausgangsbildes sind laut [36] mit $r = \sqrt{\hat{x}^2 + \hat{y}^2}$ wie folgt definiert:

$$\delta_x = \hat{x}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) + [p_1(r^2 + 2\hat{x}^2) + 2p_2 \hat{x} \hat{y}](1 + p_3 r^2 + \dots) \quad (3.6)$$

$$\delta_y = \hat{y}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) + [2p_1 \hat{x} \hat{y} + p_2(r^2 + 2\hat{y}^2)](1 + p_3 r^2 + \dots) \quad (3.7)$$

Der Bezugspunkt bzw. Koordinatenursprung ist hierbei der Prinzipalpunkt des Kameramodells, im Idealfall exakt die Bildmitte. Abbildung 3.18 zeigt das Beispiel eines korrigierten Bildes. Die Güte der Korrektur kann in Folge im korrigierten Bild mit den selben Techniken ermittelt werden, mit der die Eckpunkte in den Ausgangsbildern ermittelt wurden ([39], Abb. 3.17). Längere Testreihen zeigten, dass sich im vorliegenden Anwendungsfall mit dem Algorithmus nach Zhang allein keine befriedigende Kalibrierung des Kamerasystems erreichen lässt - die ermittelten Ecken des Schachbrettes lassen sich schlicht nicht zu Rechtecken mit parallelen Kanten gruppieren. Die Abweichung ist dabei bereits visuell (Zeichendreieck) erkennbar und deutlich größer als die Kameraauflösung. Eine genauere Prüfung der Daten zeigt, dass sich mit einer zusätzlichen perspektivischen Korrektur die Ergebnisse deutlich verbessern lassen (Abb. 3.19). Es konnte nachgewiesen werden, dass diese perspektivische Verzerrung nicht auf die Montage der Kamera zurückzuführen ist und somit eine Schwäche der ersten Korrektur kompensiert⁷. Im Gegensatz zu Abb. 3.18 wurden hier nicht alle Pixel des Ausgangsbildes transformiert, sondern nur die, die den maximalen rechteckigen

⁷Daraus folgt, dass die Verzerrungen der Optik in unserem Fall zu intensiv für eine befriedigende Kalibrierung nach [35] allein sind. In der Dokumentation der Ende 2014 veröffentlichten OpenCV-Version 3.0 α wird

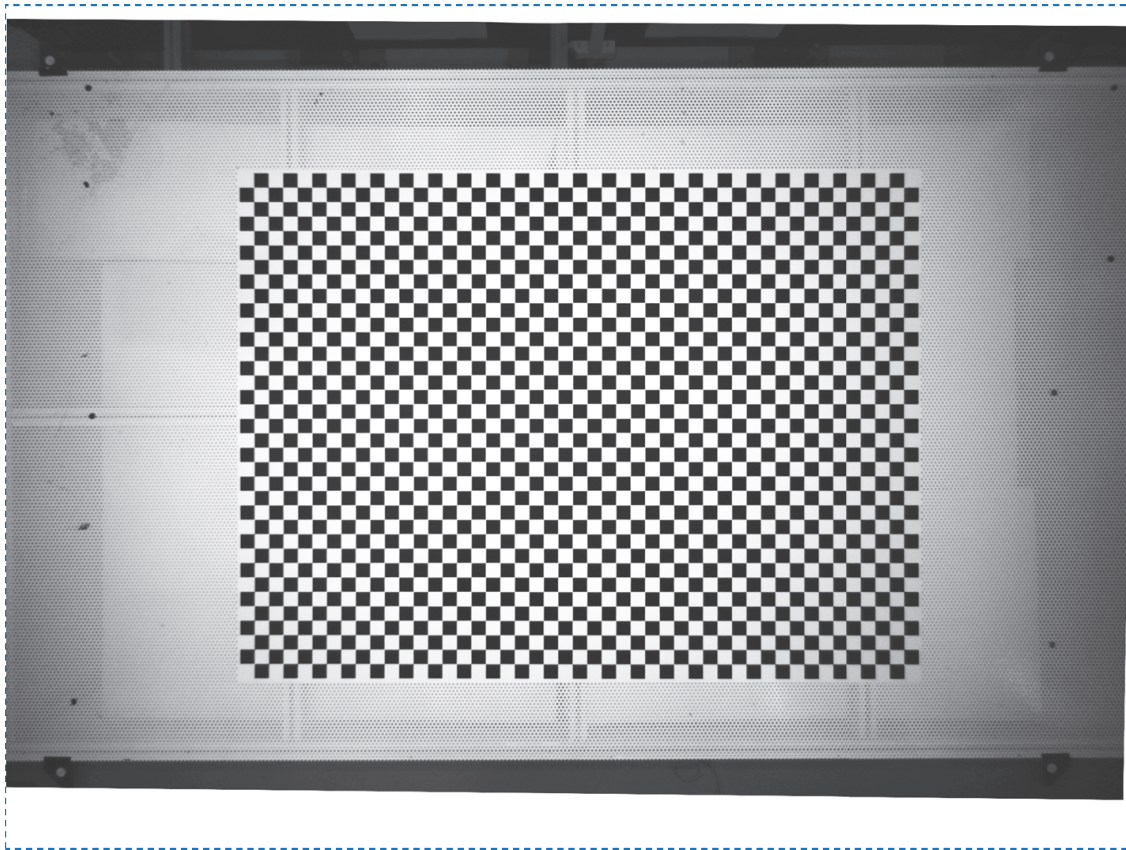


Abbildung 3.19: Entzerrtes Bild mit zusätzlicher Perspektivkorrektur

Ausschnitt mit ausschließlich gültigen Pixeln ergeben. Die Verbesserung ist auch hier mithilfe eines Zeichendreiecks bereits visuell deutlich erkennbar, so dass die Quantifizierung der Fehler jetzt sinnvoll ist. Dazu wurde den detektierten Schachbrett-Eckpunkten ein Gitter überlagert, das als freie Parameter eine Translation in x und y , eine Rotation um z sowie eine Skalierung aufweist. Die freien Parameter wurden mit einem Least-Squares-Fit auf minimalen Fehler angepasst, die Skalierung wurde ins Zuschnittserkennungssystem übernommen. Die absoluten Abweichungen in der x - y -Ebene im Inneren des Schachbretts reichen von minimal 0,003 mm bis maximal 0,663 mm, der Mittelwert beträgt $\mu=0,153$ mm bei einer Standardabweichung von $\sigma=0,089$ mm (Abb. 3.20). Da die Abweichungen in der Bildmitte 0,1 mm nicht überschreiten, ist das Ergebnis sehr zufriedenstellend, bedingt aber im weiteren Verlauf, dass für höchste Präzision eine zweite Aufnahme gemacht werden muss, bei der der Roboter so verfahren wird, dass der Zuschnitt in der Mitte des neuen Sichtfelds der Kamera liegt. Die zur Genauigkeitssteigerung erfolgreich eingeführte Perspektivkorrektur hat eine weitere Besonderheit zur Folge: sie gilt ausschließlich in einem Arbeitsabstand. Das bedeutet, dass Standardmodelle zur Hand-Auge-Kalibrierung [38], die auf einem Lochkameramodell basieren, nicht mehr greifen. Die Herstellung des Bezugs zwischen Kamerabild und Roboterkoordinatensystem muss also auf anderem Wege erfolgen und ist lediglich zweidimensional; der Abstand in z -Richtung bei der Aufnahme ist fest vorgegeben und immer gleich. Eine Zusammenfassung der Parameter des Bildverarbeitungssystems im Greiferabstand von 1000 mm⁸ gibt Tabelle 3.1.

ein alternatives, für Fisheye-Objektive mit sehr kurzen Brennweiten optimiertes, Kameramodell erwähnt [40], das in weiterführenden Tests untersucht wird.

⁸Der Kameraabstand ist um ca. 40 mm größer um Kollisionen der Kamera mit dem Tisch zu vermeiden. Da die Kamera keinen exakt definierten Bezug zur Saugerebene hat, wurde sich auf diese bezogen.

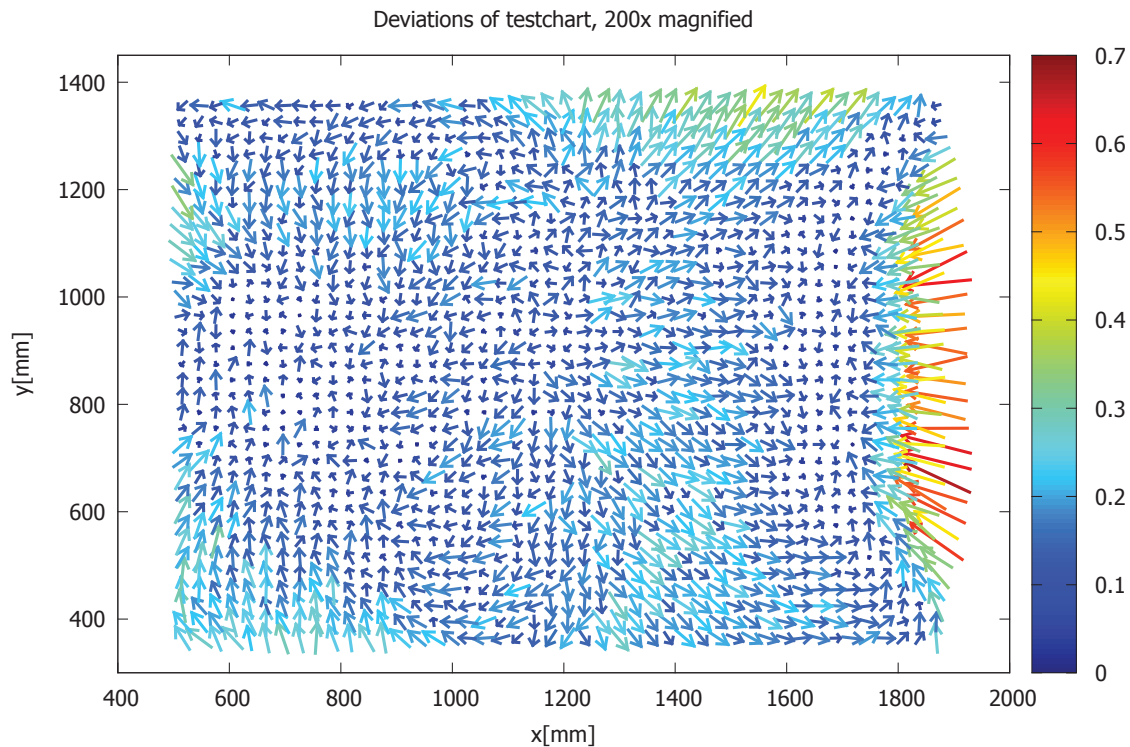


Abbildung 3.20: Vektorielle Darstellung der Abweichung vom idealen Schachbrettmuster in 200-facher Überhöhung, Mittelwert 0,15 mm

Weniger leicht zu beantworten ist die Frage nach der Genauigkeit der Detektion eines Musters mittels Template Matching. In erster Näherung kann man diese Genauigkeit als nicht schlechter als die mittlere Kamerakalibrierung im vom Zuschnitt überdeckten Bereich schätzen, der genaue Einfluss ist jedoch aufgrund des Verfahrens schwer quantifizierbar.

Tabelle 3.1: Zusammenfassung der Parameter des Bildverarbeitungssystems

Kameraauflösung	1936 x 1456	Pixel
Abbildungsmaßstab	0,833	Pixel / mm
	1,201	mm / Pixel
Gültiger Bildausschnitt	2318 x 1578	mm
Vermessener Bildausschnitt	1350 x 990	mm
Abweichung	0,003 .. 0,663	mm
Mittlere Abweichung	0,153	mm
Standardabweichung	0,089	mm
Abweichungen in der Bildmitte	<0,1	mm

3.2.2 Verlässlichkeit der Detektion

Neben der erzielbaren Genauigkeit ist es von hoher Wichtigkeit, vorhandene Zuschnitte sicher zu erkennen. Von noch höherer Bedeutung, da im Fehlerfall kritischer, ist die Vermeidung von Fehldetektionen (vgl. Anforderung 6 in Abschnitt 3.1.1). Hinweise zur Bewertung der

Verlässlichkeit der Detektion finden sich in der Informatik bei der Bewertung von Klassifikatoren⁹ [41]. Für einen gegebenen Zuschnitt nimmt der Auswertealgorithmus nichts Anderes als eine Klassifikation des ihm präsentierten Bildmaterials vor, Klassifikationskriterium ist die Frage ob der Zuschnitt enthalten ist oder nicht. Ein gutes visuelles Mittel ist die Erstellung einer Receiver-Operator-Characteristics-Kurve (ROC-Kurve): hinreichend viele Bilder, die einen gegebenen Zuschnitt entweder enthalten oder nicht werden dem Algorithmus präsentiert, in unserem Fall aus dem Use-Case 1 (Abb. 3.21).

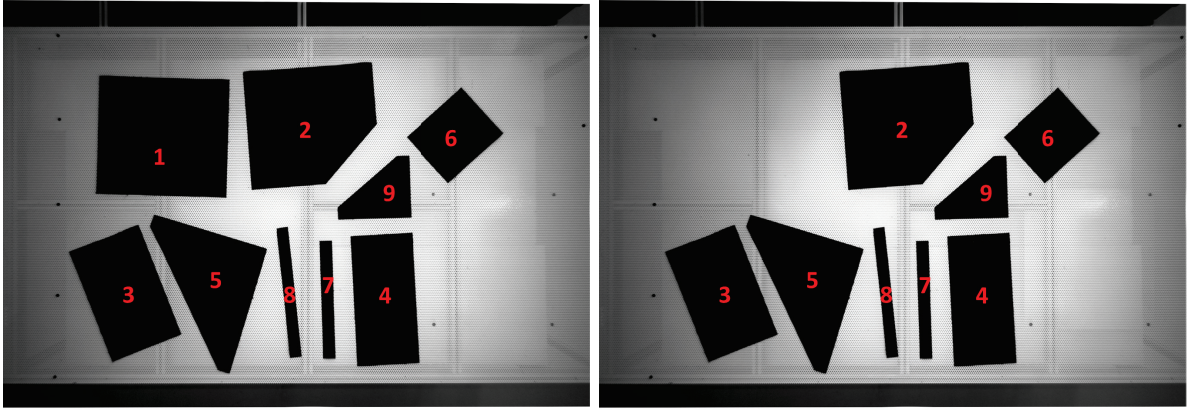


Abbildung 3.21: Testbilder mit Plynummern aus Use-Case 1

Unter Variation der freien Parameter des Algorithmus, in unserem Fall des Schwellwerts für eine positive Detektion, wird der jeweilige Anteil der richtig positiv klassifizierten Bilder gegen den Anteil der fälschlicherweise positiv klassifizierten Bilder aufgetragen. Die Winkelhalbierende im Diagramm ist hierbei äquivalent zur Klassifikation durch Raten, Ziel ist eine Kurve die vom Punkt (0/0) auf (0/1) springt und sich dann mit $y=1$ nach (1/1) fortsetzt, d. h. möglichst viele richtig positive Klassifikationen unter Vermeidung von Fehldetektionen aufweist. Als Kenngröße kann die Fläche unter der ROC-Kurve (Area under the ROC Curve oder AUC) herangezogen werden, Sie sollte möglichst nahe an 1 liegen. Voruntersuchungen [25] hatten für den Template Matcher bereits relativ gute Ergebnisse gezeigt, eine genauere Untersuchung mit einem standardisierten Testdatensatz aus Use-Case 1 (Abschnitt 4.2) zeigte sehr gutes Verhalten. In unserem Testdatensatz wurden alle neun Zuschnitte auf dem Tisch sowie der leere Tisch aufgenommen. Anschließend wurden aus diesen Aufnahmen mittels eines geeigneten Programms alle 512 möglichen Permutationen der neun Zuschnitte auf dem Tisch generiert und je mit allen neun Zuschnitten verglichen, insgesamt wurden also 4608 Klassifikationen hinsichtlich des Vorhandenseins eines bestimmten Zuschnitts durchgeführt, wobei dieser in je 50% der Fälle im Bild enthalten ist. Wie in Abbildung 3.22 zu sehen erreicht man bei einem Schwellwert von 0,92 einen Anteil von richtig positiv erkannten Zuschnitten von 99,5% bei null Fehldetektionen; die AUC ist dabei mit 0,99808 sehr nahe an 1. Dies bedeutet jedoch längst nicht, dass Fehldetektionen sicher auszuschließen sind. Es lässt sich mittels statistischer Methoden aber abschätzen, wie wahrscheinlich eine Fehldetektion bei gegebenem Signifikanzlevel, z. B. 90% ist. Sei P die Wahrscheinlichkeit für eine Fehldetektion, n die Anzahl Versuche ohne eine Fehldetektion und S die Signifikanz des Tests. Dann gilt

$$(1 - P)^n > (1 - S) \Leftrightarrow P < 1 - (1 - S)^{(1/n)} \quad (3.8)$$

⁹Ein Algorithmus, der gegebene Eingangsdaten in Kategorien unterteilt, z. B. „ist ein Gesicht“ oder „ist ein gültiger Messwert“.

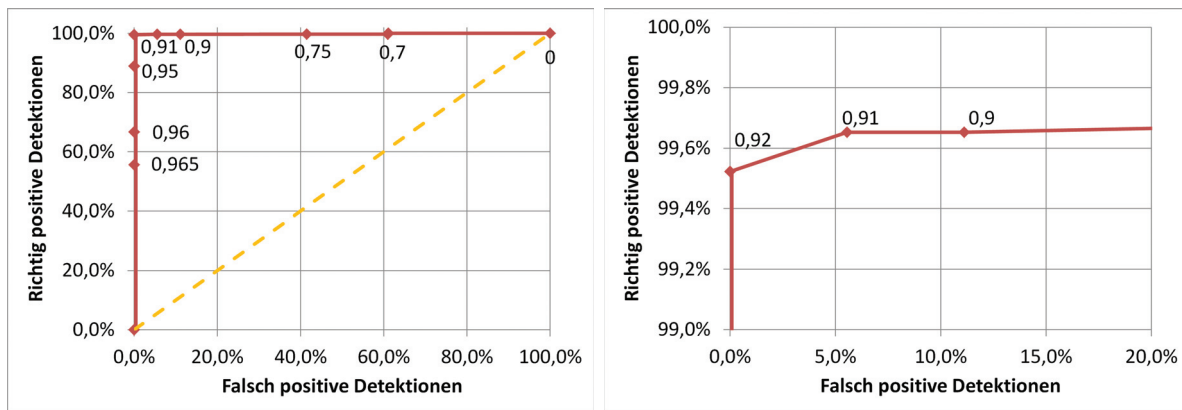


Abbildung 3.22: Verlässlichkeit der Detektion für Zuschnitte aus Use-Case 1 dargestellt an einer Receiver-Operator-Characteristics-Kurve. In der Datenbeschriftung ist der verwendete Schwellwert angegeben.

Durch Einsetzen von $n=2304$ ($=9 \cdot 512/2$) und $S=0,9$ erhält man bei einer Signifikanz von 90% eine Wahrscheinlichkeit von $P < 10^{-3}$ für eine Fehldetektion, was die in Abschnitt 3.1.1 formulierten Fehldetektionsrate von 10^{-6} um den Faktor 1000 übersteigt. Zum Nachweis derselben bei 90%-iger Signifikanz würde man $2,3 \cdot 10^6$ Testbilder bzw. mit unserer Vorgehensweise 1000 Aufnahmen für 500 Testsätze benötigen; die reine Rechenzeit für die Auswertung würde auf einem derzeit handelsüblichen PC mit etwa 57 Tagen zu Buche schlagen. Da das Ergebnis von anderen Einflüssen wie Änderungen am Algorithmus, der Beleuchtungssituation, der Zuschnittsgeometrie oder des Zuschnittsmaterials verändert werden kann und diese Parameter noch nicht festgelegt sind, kann der Nachweis folglich nicht im Rahmen dieser Arbeit erfolgen - begnügen wir uns also vorerst mit $P < 10^{-3}$ bei einem Signifikanzniveau von 90%.

Eine schwierigere Situation hinsichtlich falsch positiver Detektion bietet Use-Case 2, da die Zuschnitte sich häufig nur im Bereich von wenigen Millimetern unterscheiden, also eine höhere Gefahr der Verwechslung besteht, als bei den soeben betrachteten, geometrisch sehr unterschiedliche Zuschnitten. Analog zum Vorgehen für Use-Case 1 wurden Testmuster aufgenommen, das Bildmaterial aufbereitet und die ROC-Kurve erstellt (Abb. 3.23 links). Das Ergebnis ist erwartungsgemäß deutlich schlechter als bei Use-Case 1: je nach Wahl

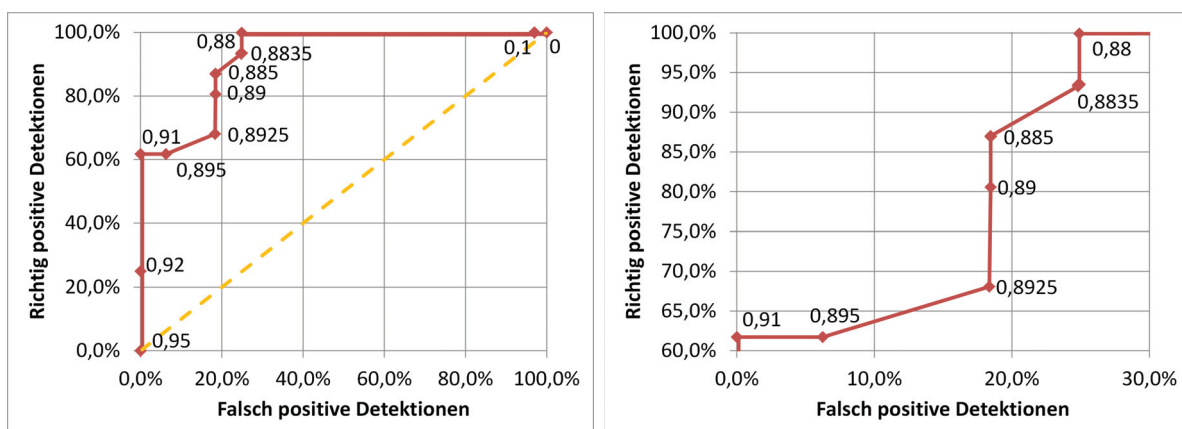


Abbildung 3.23: Verlässlichkeit der Detektion für Zuschnitte aus Use-Case 2. Der jeweils verwendete Schwellwert ist als Datenbeschriftung angegeben.

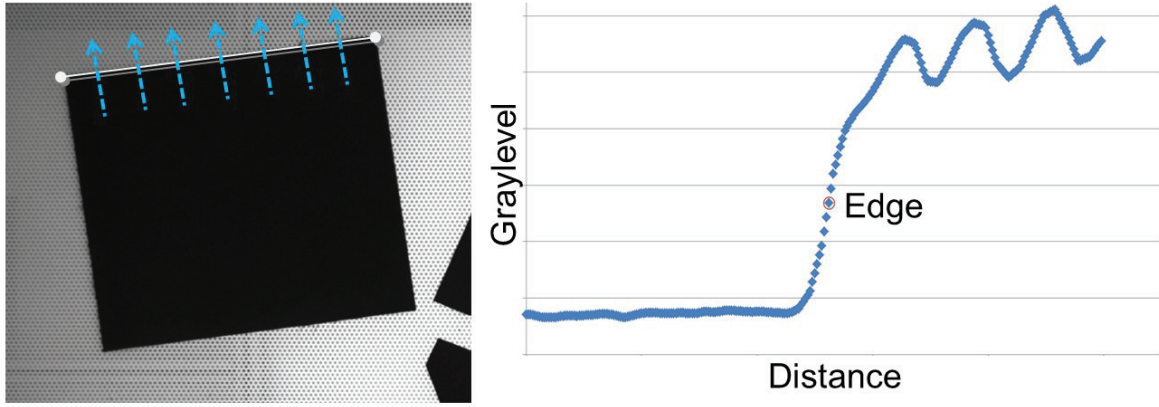


Abbildung 3.24: Bestimmung der Maßhaltigkeit eines Zuschnitts durch Kantendetektion

des Schwellwerts erhält man zwischen 99,9% richtig positive Detektionen bei 25% fälschlich detektierten Zuschnitten (Schwellwert 0,88) oder lediglich 62% korrekte Detektionen unter Ausschluss von Fehldetektionen (Schwellwert 0,91), d. h. es existiert kein gangbarer Mittelweg durch Schwellwertbildung. Die AUC beträgt 0,92432 und ist damit deutlich schlechter als bei Use-Case 1. Somit besteht unmittelbarer Bedarf, die Verlässlichkeit der Detektion zu steigern.

3.2.3 Sichere Detektion kleiner Dimensionsabweichungen

Wie eben gezeigt ist die Positionsbestimmung durch Template Matching überaus robust und zeigt bezüglich der Rate der richtig positiv detektierten Zuschnitte bei geeigneter Wahl des Schwellwerts sehr gutes Verhalten. Unbefriedigend ist hingegen das Verhalten bei sehr ähnlichen Zuschnitten, insbesondere falls der richtige Zuschnitt sich nicht auf dem Tisch befindet sondern nur ein nahezu identischer. Der Korrelationskoeffizient ändert sich bei kleinen Geometrieabweichungen nur geringfügig, und so gelingt es nicht mittels Festlegung eines Schwellwerts die benötigte geringe Rate an falsch positiven Detektionen zu erreichen (vgl. 3.1.1 und 3.2.2). Da diese Robustheit ja Auslegungskriterium und für die Detektion als positiv zu bewerten ist, wurde ein Verfahren gesucht, das ergänzend zur Robustheit eine Aufspreizung der Detektionswerte bei ähnlichen Zuschnitten erlaubt. Idee war, ähnlich wie in anderen Projekten am ZLP bereits gezeigt [42], die Messung der Zuschnittskanten in die Bewertung des Zuschnitts mit einzubeziehen. Nach dem Template Matching (vgl. 3.1.4) ist die Lage des Zuschnitts im Kamerabild bekannt. Ebenso bekannt ist damit die Lage der aus dem Plybook übernommenen Außenkontur, der man nun im Kamerabild folgen kann. Senkrecht zur Idealkontur werden in geringem Abstand Schnitte gelegt (Abb. 3.24). Betrachtet man den Schnitt vom Inneren des Zuschnitts nach außen wird der Grauwert an der Zuschnittskante einen Sprung nach oben machen¹⁰. Detektiert man diesen Sprung z. B. durch Schwellwertbildung, ergibt sich ein Maß für die Lageabweichung d der Zuschnittskante. Da die Werte anfällig gegenüber kleinen Störungen, wie z. B. Faserstücke an der Schnittkante sind, ist es sinnvoll, fehlerhafte Messwerte zu eliminieren, was durch Verwendung des modifizierten z-scores automatisiert möglich ist [43]. Ersetzt man den Korrelationswert aus 3.1.4, Gleichung 3.2, durch einen Score-Wert S gemäß

$$S = c - 0.2 \cdot |MED| \quad (3.9)$$

¹⁰Die Wellen im rechten Bereich sind durch die Luftlöcher im Zuschnittstisch verursacht.

so erhält man ein Bestimmtheitsmaß, das stark sensitiv auf Geometrieabweichungen ist. Hierbei steht *MED* für den Median-Wert, d. h. den in der Mitte der sortierten Messwerte befindlichen Wert. Der Wert

$$MAD = MED(d_i - MED(d_i)) \quad (3.10)$$

beschreibt den Median der Beträge der Abweichungen vom Median. *MED* und *MAD* ähneln Mittelwert und Standardabweichung, sind aber weniger anfällig gegen Ausreißer durch Messfehler. Sie können als stark verdichtete Kenngrößen für die Güte von Zuschnitten Verwendung finden. Der Malus von $0,2 \cdot |MED|$ wurde hierbei nach Vortests für gut befunden, könnte aber durch genauere Untersuchungen sicherlich noch weiter verbessert werden.

Ein Beispiel für die durch Verwendung des Score-Werts *S* erzielten Ergebnisse liefert der Use-Case Stringerbase (Abschnitt 4.3): bei der Detektion zweier Zuschnitte der Größe 948 mm x 145 mm und 958 mm x 139 mm (Abb. 3.25) bei Vergleich mit der Geome-

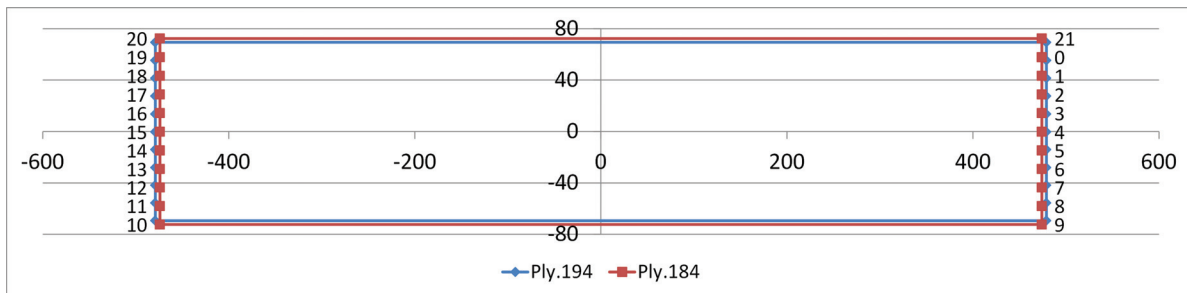


Abbildung 3.25: Dimensionsvergleich zweier Zuschnitte aus Use-Case 2

trie von Zuschnitt 1 erhält man im Korrelationskoeffizienten nur einen wenig ausgeprägten Unterschied von 0,95 zu 0,91 (robuste, aber fehlerhafte Detektion), während der Score gemäß Gleichung 3.9 sich von 0,89 auf 0,56 deutlich reduziert. Somit kann mittels des Scores Zuschnitt 2 ausgeschlossen und eine robuste Detektion mit einem geringen Anteil an Fehldetektionen kombiniert werden.

Die beste Möglichkeit zur Evaluierung bieten die ROC-Kurven aus Abschnitt 3.2.2. Diese werden mit den vorhandenen standardisierten Testdatensätzen aus Use-Case 1 und 2 unter Verwendung des Score-Wertes neu berechnet. Betrachten wir zunächst den kritischeren Fall der Stringerbase (Abb. 3.26): Im Vergleich zu den ausschließlich mit Template Matching erzielten Ergebnissen (Abb. 3.23) zeigt sich nun eine nahezu Ideale ROC-Kurve. Die AUC steigt von 0,92432 auf 0,98577 an und es gelingt 99,4% der Zuschnitte richtig positiv zu detektieren, ohne eine einzige falsch positive Detektion zu erhalten. Weniger ausgeprägt, da auf ein ohnehin schon gutes Ergebnis angewendet, ist der Effekt bei den Thermoplast-Organoblechen. Die AUC steigt von 0,99808 auf ein nahezu perfektes 0,99974 an und es können 99,7% der Zuschnitte frei von Fehldetektionen als richtig positiv erkannt werden. Der direkte Vergleich der relevanten Bereiche ist in Abb. 3.27 zu sehen.

Die erzielten Ergebnisse sprechen für sich und sind im Rahmen dessen, was in dieser Arbeit erreicht werden kann, in höchstem Maße befriedigend. Es lässt sich feststellen, dass für eine abschließende Quantifizierung der Robustheit und Verlässlichkeit des Verfahrens die verwendeten Testsätze aufgrund der geringen Stückzahl nicht ausreichen und da material-induzierte Einflüsse nicht breitbasig genug untersucht werden konnten. Die ROC-Kurven erwiesen sich als gutes Werkzeug zur Ermittlung von optimalen Detektionsparametern sowie zum objektiven Test von Optimierungen am Detektionsverfahren.

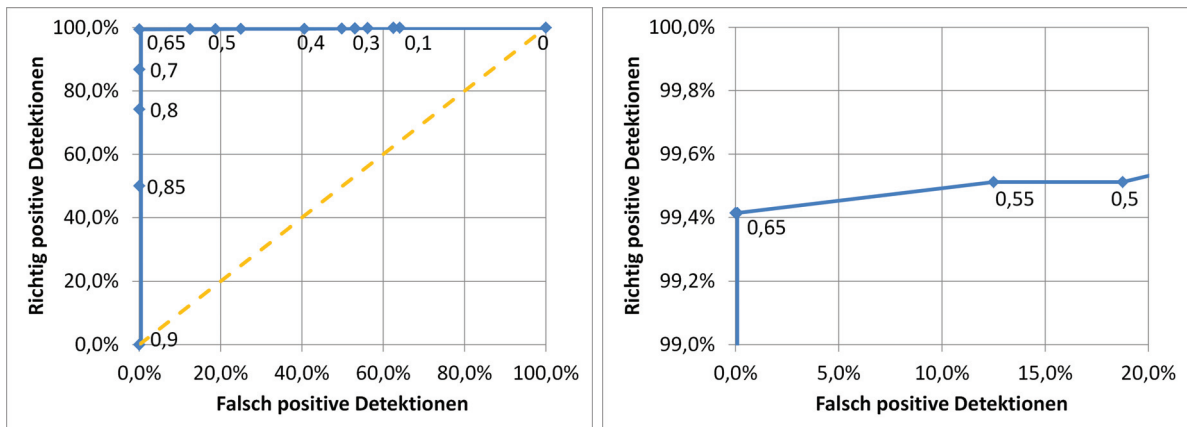


Abbildung 3.26: Stark verbessertes Detektionsverhalten durch Verwendung eines Score-Werts aus Kreuzkorrelation und Abweichung der Kante vom Sollwert. In der Datenbeschriftung ist der jeweilige Schwellwert angegeben.

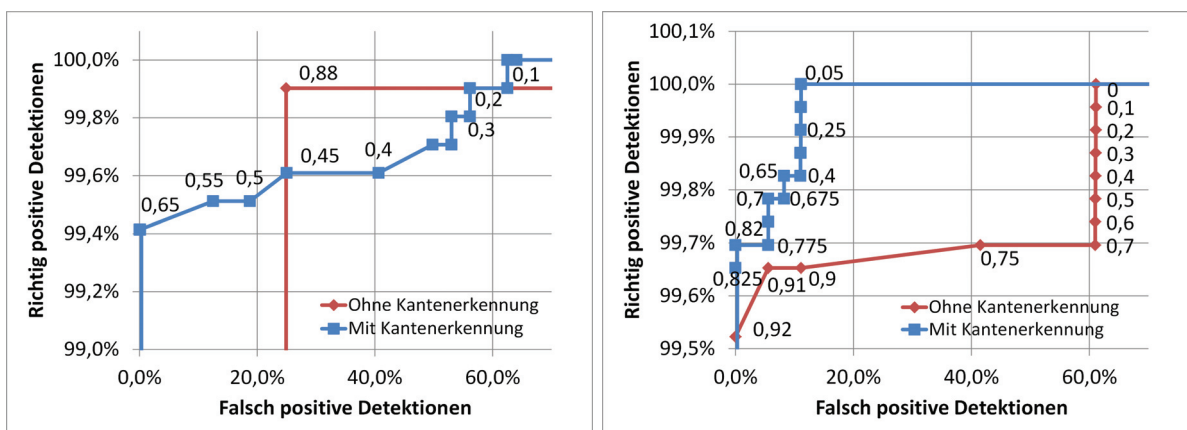


Abbildung 3.27: Vergleich des relevanten Bereichs der mit Score-Wert erstellten ROC-Kurven für Stringerbase (links) und Thermoplast-Organoblech (rechts). Der jeweilige Schwellwert ist als Datenbeschriftung angegeben.

Auf jeden Fall sollte an der Verbreiterung der Datenbasis weitergearbeitet werden, um überhaupt die Möglichkeit weiterer Optimierungen zu schaffen und somit für künftige Anwendungen bestmöglich gewappnet zu sein. Der abschließende Beweis der Verlässlichkeit, vor allem im Hinblick auf die Vermeidung von Fehldetektionen, kann erst bei einem Einsatz auf breiterer Front oder in einem Produktionsumfeld geführt werden.

3.2.4 Ermittlung des Faserwinkels mittels zweidimensionaler Fast Fourier Transformation (2D-FFT)

In Abschnitt 3.2.2 wurde untersucht, wie gut die Algorithmen zur Zuschnittserkennung arbeiten. Hierbei wurde lediglich die Verlässlichkeit der Identifikation geometrisch unterschiedlicher Zuschnitte betrachtet; geometrisch identische Zuschnitte sind mit den angegebenen Verfahren nicht unterscheidbar. Sofern das Material bzw. der Faserwinkel übereinstimmt ist eine Unterscheidung nicht nötig, man kann von identischen, ununterscheidbaren Zuschnitten ausgehen. Ist dies nicht der Fall stellt sich die Frage, ob mit dem gegebenen System auch Zuschnitte identischer Geometrie anhand der Faserorientierung unterschieden werden können. Diverse Ansätze aus der Bildverarbeitung wie etwa die Hough-Transformation oder die Berechnung der Momente der Grauwertverteilung könnten auf einer geeigneten ROI¹¹ zum Einsatz kommen, doch ist die Abbildungsqualität des Systems auflösungsbedingt relativ schlecht und die Ergebnisse dieser Ansätze hängen stark davon ab.

Fourieranalyse

Für den geplanten Einsatzzweck wird keine genaue, orts aufgelöste Kenntnis des Faserwinkels benötigt, sondern nur ein möglichst genauer integraler Wert, der Rückschlüsse auf die Laufrichtung des Materials zulässt. Ein probates Mittel zur Analyse gegebener Signale hinsichtlich periodischer Anteile ist die Fourieranalyse [56, 57]. Das gegebene Signal $f(x)$ wird auf dem Intervall $[-\pi, \pi]$ nach trigonometrischen Funktionen entwickelt gemäß

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos kx + b_k \sin kx) \quad (3.11)$$

Unter Nutzung der komplexen Exponentialfunktion mit der Beziehung

$$e^{i\phi} = \cos\phi + i\sin\phi \quad (3.12)$$

lässt sich Gleichung 3.11 in Kurzform schreiben als

$$f(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{ikx} \quad (3.13)$$

Betrachtet man allgemeiner das Intervall $[0, L]$, wird 3.13 angepasst zu

$$f(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{2\pi i k x / L} \quad (3.14)$$

mit den Fourierkoeffizienten

$$c_k = \frac{1}{L} \int_0^L f(x) e^{-2\pi i k x / L} \quad (3.15)$$

¹¹Region of interest, zu betrachtender Bereich eines Bildes.

Ist $f(x)$ reell, dann gilt $c_{-k} = c_k^*$. Liegen nur diskrete Werte x_n für $f(x)$ vor, wie z. B. bei der Abtastung von N Samples eines analogen Signals im Intervall $[0, L]$, so spricht man auch von Diskreter Fourier Transformation (DFT). Das Integral in 3.15 wird zur Summe, wobei die Länge L des Intervalls verschwindet. Die Fourierkoeffizienten c_k sind:

$$c_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-2\pi i k n / N} \quad (3.16)$$

Analog dazu lautet die Rücktransformation vom Frequenz- in den Ortsraum:

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{2\pi i k n / N} \quad (3.17)$$

Bei der Transformation in den Frequenzraum und zurück tritt abgesehen von numerischen Unzulänglichkeiten kein Informationsverlust ein. Auch für die DFT existiert für reelle Eingangsdaten $x_n \in \mathbb{R}$ mit $c_k = c_{N-k-1}^*$ eine Symmetrie im Frequenzraum. N komplexe Eingangswerte mit Imaginärteil 0 ergeben folglich N komplexe Ausgangswerte mit einer Redundanz von 2. Für die Berechnung der Koeffizienten können geschwindigkeitsoptimierte Algorithmen zur sog. Fast Fourier Transformation (FFT) eingesetzt werden. Eine häufige Einschränkung ist dabei die Festlegung der Werteanzahl auf Zweierpotenzen; es existieren verschiedene Erweiterungen mit teils unerwartetem Verhalten für $N \neq 2^n$ ¹². Eine sehr schnelle, zuverlässige Implementierung ohne Einschränkung der Werteanzahl findet sich in der Bibliothek FFTW [59, 60]. Aufgrund der eigenen guten Erfahrung in vorangegangenen Arbeiten wurde die FFTW-Bibliothek im Weiteren verwendet.

Für die digitale Bildverarbeitung von Interesse ist nun die Verallgemeinerung der Gleichungen 3.16 und 3.17 auf zwei Dimensionen, d. h. die Anwendung auf ein Grauwertbild $F(n, m)$ mit $n, m \in \mathbb{N}$. Dies gelingt mittels:

$$\hat{F}(k, l) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} F(n, m) e^{-2\pi i (k n / N + l m / M)} \quad (3.18)$$

Die 2D-DFT ist separierbar gemäß:

$$\hat{F}(k, l) = \sum_{m=0}^{M-1} \left(\sum_{n=0}^{N-1} F(n, m) e^{-2\pi i k n / N} \right) e^{-2\pi i l m / M} \quad (3.19)$$

Das bedeutet, die DFT des Bildes ist die spaltenweise ausgeführte DFT der DFT der Zeilen¹³. Für die Rücktransformation gilt:

$$F(n, m) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \hat{F}(k, l) e^{2\pi i (k n / N + l m / M)} \quad (3.20)$$

wobei die Separation analog durchgeführt werden kann. Für die Normierungsfaktoren $1/L$, $1/N$ oder $1/MN$ in den vorangegangenen Gleichungen finden sich in der einschlägigen Literatur drei Varianten, da es für die Transformation unerheblich ist, ob man bei der Hin- oder Rücktransformation normiert oder die Normierung auf beide aufteilt. Für viele Anwendungszwecke ist es ausreichend die Frequenzspektren nur qualitativ zu betrachten, da

¹²Für eine anschauliche Einführung zu möglichen diesbezüglichen Artefakten siehe z. B. [58]

¹³... oder die zeilenweise ausgeführte DFT der DFT der Spalten, dies ist prinzipiell egal

man sich mehr für die Lage von Peaks interessiert als für deren absolute Höhe. Möchte man hingegen tatsächliche Amplituden berechnen, so ist es wichtig, die Normierung korrekt durchzuführen. Der Autor hat im Verlauf mehrerer Jahre noch keine Implementierung gesehen, in der dies richtig ausgeführt oder in irgendeiner Weise dokumentiert war, und so ist meist etwas Experimentieren nötig um korrekte Amplitudenwerte zu erhalten. Ebenso ist es reine Konvention, in welchen Teil der Ergebnis-Arrays die hohen und die tiefen Frequenzen abgespeichert werden, und auch hier ist eine bibliotheksabhängige, experimentelle Herangehensweise nötig. Für die Bildverarbeitung günstig ist eine Darstellung, bei der die Frequenz 0 in die Bildmitte gerückt wird. Man betrachtet dann ein Amplituden- und ein Phasenbild mit $\hat{A}_{k,l} = \sqrt{\Re^2(\hat{F}_{k,l}) + \Im^2(\hat{F}_{k,l})}$ und $\hat{\Phi}_{k,l} = \arctan(\Im(\hat{F}_{k,l})/\Re(\hat{F}_{k,l}))$.

Ergebnisse

Für die in den Use-Cases verwendeten Materialien konnte gezeigt werden, dass im Bildmaterial nach Kontrastspitzung eine deutliche Zeichnung sichtbar wird, die jedoch nicht auf Anrieb zuordenbar ist (Abb. 3.28, 3.29, 3.30 links). Zur genaueren Untersuchung wurden Fourieranalysen durchgeführt; nach einer Hochpassfilterung zur Unterdrückung der niederfrequenten Anteile erhält man verwertbare Spektren.

Bei dem mit thermoplastischer Matrix vorimprägnierten 4/1 Atlasgewebe aus Use-Case 1 erweist sich die Situation als komplex, da das Reflexionsverhalten des Materials vom Winkel zwischen Kamera und Fasern abhängig ist. Dieser hängt seinerseits vom durch Kett- und Schussfaden gebildeten Höhenprofil ab. Bei der 4/1 Atlas-Bindung führt der Schussfaden unter vier Kettfäden hindurch und dann über einen hinweg; beim folgenden Schussfaden wird dieses Muster um zwei Rovings in Laufrichtung je nach Material nach links oder rechts versetzt, was zu dem typischen Erscheinungsbild von Erhöhungen im Verhältnis von 2:1 führt. Bei Laufrichtung entlang der x-Achse liegen die erhabenen Stellen folglich je nach Material in einem Winkel von $\Phi = \arctan\frac{2}{1} \approx 26,6^\circ$ bzw. $116,6^\circ$ oder unter $\Phi = \arctan\frac{1}{2} \approx 63,4^\circ$ bzw. $153,4^\circ$. Abbildung 3.28 zeigt das Fourierspektrum eines Beispielzuschnitts.

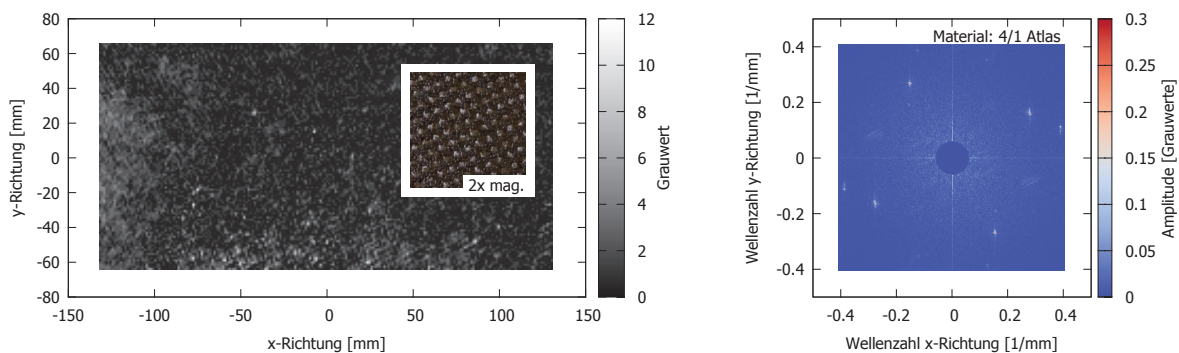


Abbildung 3.28: Ermittlung des integralen Faserwinkels mittels zweidimensionaler Fast Fourier Transformation bei einem 4/2-Atlas Gewebe

In der Mitte des Bildes befindet sich die Frequenz 0 (Gleichanteil oder Mittelwert), zum Rand hin befinden sich die Amplituden für die höheren Ortsfrequenzen $1/L, 2/L, 3/L$ u. s. w. mit L =Bildgröße. Das Spektrum zeigt vier auffällige Peaks bei Winkeln von $30,1^\circ$ und $119,5^\circ$ und jeweils $+180^\circ$ dazu. Der Zuschnitt war, wie eine Geometriemessung ergab, um $2,4^\circ$ rotiert, was in guter Übereinstimmung mit den aus der Peaklage ermittelten Winkelabweichung von $3,5^\circ$ und $2,9^\circ$, gemittelt $3,2^\circ$, ist. Aufgrund der 90° -Symmetrie der Peaks kann aus der

Peak-Lage allein nicht auf die Materialrichtung geschlossen werden. Das Amplitudenspektrum zeigt ferner eine leicht anisotrope Verteilung entlang der horizontalen und vertikalen Achsen, die eventuell zur eindeutigen Identifizierung der Peaks genutzt werden könnten, die Datenlage ist derzeit aber noch zu dünn. Durch die Webart ist eine Verdrehung um 90° nicht zulässig, und es muss daher bei der Materialzuführung darauf geachtet werden, dass symmetrische Zuschnitte um nicht mehr als $\pm 45^\circ$ verdreht zugeführt werden. Diese Einschränkung kann aus produktions- und anlagentechnischen Gründen bereits sinnvoll sein, da jede betragsmäßig große Verdrehung wertvolle Prozesszeit kostet, der Ablagegenauigkeit abträglich ist und vermeidbaren Verschleiß im Bereich des Kabelschlepps mit sich bringt (vgl. Abschnitt 3.4.6). Für Use-Case 1 war dies indes unerheblich, da keine derartigen Zuschnitte im Plybook enthalten waren und aufgrund der hier günstigen Kombination aus Greiferkonstruktion und Roboterpose auch keine ernsthaften Probleme mit dem Kabelschlepp auftauchten.

Für die Multiaxialgelege aus Use-Case 2 ergeben sich die in Abb. 3.29 rechts gezeigte Amplitudenspektren. Es zeigen sich vier unterschiedliche Spektren. Unabhängig vom Material finden sich in y-Richtung Peaks der Wellenzahl $0,2 \text{ mm}^{-1}$ mit einer korrespondierenden Wellenlänge von 5 mm, die, wie im Inset links erkennbar, auf die hellen Nähte im Abstand von 5 mm zurückzuführen sind. Die Nähte können von der Kamera zwar nicht aufgelöst werden, beeinflussen aber aufgrund ihrer großen Helligkeit die Kamerapixel, in denen sie liegen. Beim $0^\circ/90^\circ$ -Material (oben) finden sich ausschließlich Peaks bei Winkeln von 90° und 225° , beim $90^\circ/0^\circ$ -Material (2. von oben) erscheint die Zickzacknaht in der Gestalt von vier Peaks in der Nähe der Winkelhalbierenden im Fourierspektrum. Beim $\pm 45^\circ$ -Material (3. von oben) und beim $\mp 45^\circ$ -Material (unten) gibt es hinsichtlich des Nahtmaterials keinen Unterschied, jedoch zeigen sich je zwei diagonale Linien, wovon jeweils die quer zur Faserichtung korrespondierende Linie stärker ausgeprägt ist. Die Fouriertransformation profitiert hier vom großen Bildausschnitt, da durch die Abtastung hinreichend vieler Wellenzüge stabile Werte im Frequenzspektrum erreicht werden, die nicht von Unzulänglichkeiten der Einzelabtastung beeinflusst sind. Da die Rovings unter die Auflösungsgrenze von ca. 2 mm fallen¹⁴, können sie nicht als Peaks im Frequenzspektrum erscheinen und liegen außerhalb des von der Fouriertransformation abgebildeten Frequenzraumes. Die Ermittlung der Laufrichtung des Materials kann hier also nur indirekt über die Analyse des Haltefadens erfolgen; alternativ sind Aufnahmen aus geringerem Abstand denkbar.

Für eine korrekte Detektion der Laufrichtung ist folglich auch hier das Material vorher zu charakterisieren und die Materialkennwerte müssen dem Auswerteprogramm zur Verfügung gestellt werden. Einschränkungen bzgl. des Aufnahmewinkels wie in Use-Case 1 bestehen hier nicht, da die Spektren nur eine zweizählige Symmetrie aufweisen und eine Verdrehung um 180° aus Materialsicht irrelevant ist.

Der Test an UD-Material aus Use-Case 3, bei dem die Größe der Fasern weit unter der Auflösungsgrenze des Kamerasystems liegt (Abb. 3.30), zeigt überraschend positive Ergebnisse. Wie beim $\pm 45^\circ$ - und $\mp 45^\circ$ -Multiaxialgelege zeichnet sich die quer zur Materialrichtung verlaufende Textur des Materials im Fourierspektrum trotz der geringen Auflösung deutlich ab - die Materialrichtung ist also senkrecht zur Peaklage. Es ist auffällig, dass das verwendete Testmaterial, das eigens für das Projekt MAI-Plast hergestellt wurde, eine starke Ondulation und im Vergleich zu anderen UD-Tapes eine übermäßige Textur aufweist. Es bleibt abzuwarten, welche Ergebnisse mit anderen UD-Materialien erreicht werden. Hiermit ist aber zumindest prinzipiell nachgewiesen, dass für die in den drei Use-Cases verwendeten Materialien die Materialrichtung mit gewissen Einschränkungen mittels Fourieranalyse bestimmt und zur Unterscheidung von Zuschnitten identischer Geometrie nach dem Material oder nach

¹⁴Laut Shannons Abtasttheorem etwa die halbe Kameraauflösung

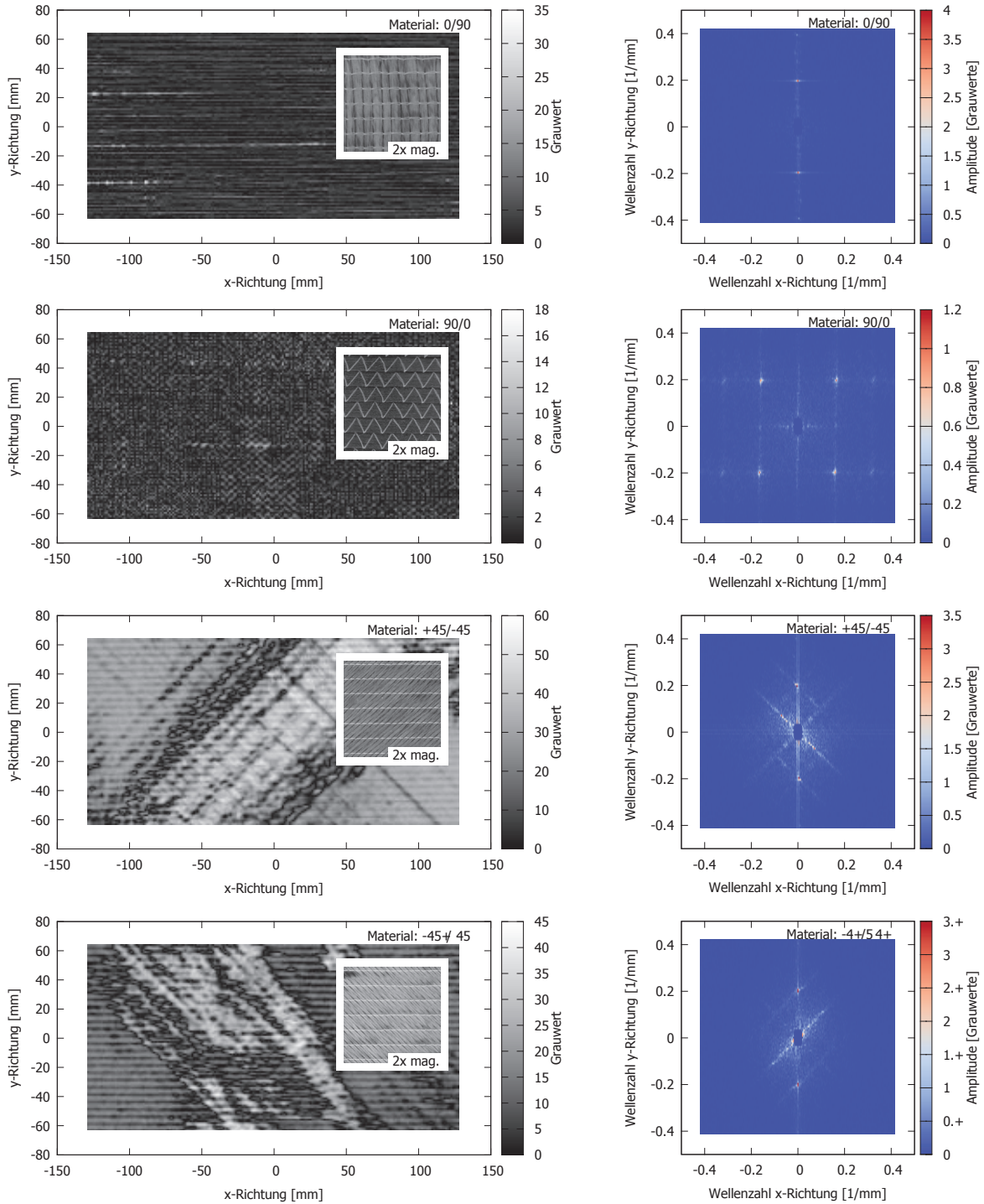


Abbildung 3.29: Ermittlung der Laufrichtung des Materials mittels zweidimensionaler Fast Fourier Transformation bei 0/90-, 90/0-, ± 45 - und ∓ 45 -Multiaxialgelegen; links Kameraaufnahmen, rechts Fourierspektren. Im Inset links ist eine höher aufgelöste, zweifach vergrößerte Aufnahme des Materials abgebildet.

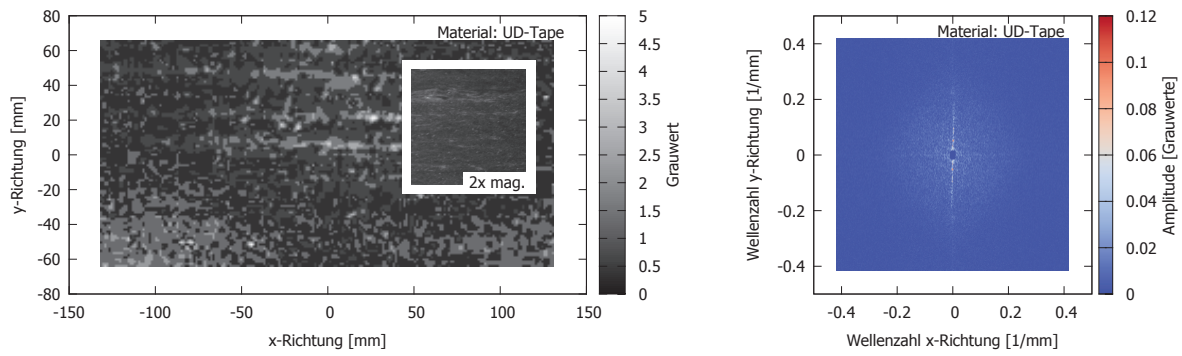


Abbildung 3.30: Ermittlung des integralen Faserwinkels mittels zweidimensionaler Fast Fourier Transformation bei einem UD-Tape

der Materialaufrichtung eingesetzt werden kann. Aus den gezeigten Daten ist klar ersichtlich, dass jedes Material vor der Fourier-Analyse charakterisiert werden muss, um überhaupt Aussagen über die Materialrichtung treffen zu können.

Wichtig und bei der Analyse zu beachten ist, dass die 2D-FFT nur mit rechteckigen Bildausschnitten möglich ist und dass der betrachtete Bildausschnitt dabei vollständig im Inneren des Zuschnitts liegen muss. Ein Helligkeitssprung an den Zuschnittskanten hat ein breites, intensives Frequenzspektrum, das das zu untersuchende, von der Lage der Rovings herrührende Signal dominiert. Daher ist hinsichtlich der Automatisierung der Auswertung das Problem des größten eingeschriebenen Rechtecks zu lösen, eine Thematik zu dem es seit den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts zahlreiche Veröffentlichungen aus der angewandten Mathematik und Informatik gibt (z. B. [61, 62]). OpenCV selbst enthält keine Implementierung, somit ist eine geeignete Implementierung zu finden und zu testen, z. B. enthält die sehr mächtige Bibliothek CGAL¹⁵ [63] eine Implementierung unter dem Namen **Largest_empty_iso_rectangle_2**, deren Test im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr erfolgen konnte; alternativ kann der Algorithmus auf Basis der Literatur selbst implementiert werden.

Unter Kenntnis dieser Einschränkung lassen sich nun die finalen Systemgrenzen für rotationssymmetrische Zuschnitte neben der oben festgestellten $\pm 45^\circ$ -Limitierung bei 4/1-Atlasgewebe aufzeigen: ein Zuschnitt, der so schmal ist, dass sich kein hinreichend großes Rechteck für die Fourieranalyse finden lässt (z. B. Ring mit dünnem Rand). Ein Zuschnitt aus Material ohne jedwede messbare Textur, d. h. mit zu geringem Signalhub¹⁶. Ein Zuschnitt aus Material, dessen Reflexionsverhalten nicht mit der Laufrichtung des Materials korreliert, z. B. aus Gründen der optischen Erscheinung kaschiertes Hybridmaterial als Decklage. Dies sind die letztlich immer vorhandenen pathologischen Fälle, in denen das System versagt. Ob solche Anwendungen künftig denkbar und auch sinnvoll sein werden, lässt sich zum aktuellen Zeitpunkt nicht abschätzen. Für die sechs Materialien aus den Use-Cases konnte gezeigt werden, dass die Systemeinschränkungen bei rotationssymmetrischen Zuschnitten mit Hilfe der zweidimensionalen Fast Fourier Transformation überwunden oder für das 4/2-Atlasgewebe zumindest reduziert werden können.

¹⁵Computational Geometry Algorithms Library.

¹⁶Für das Multiaxialgelege in Abb. 3.29 betrug der Signalhub nur zwei Grauwerte, trotzdem konnten gute Ergebnisse erzielt werden. Die Grauwertauflösung der Kamera wurde dabei mit 8 von 14 Bit um den Faktor 64 bei weitem nicht ausgeschöpft, es besteht diesbezüglich also noch erheblicher Spielraum.

3.3 Anbindung an das Robotersystem

3.3.1 Absolutpositionierung mit Industrierobotern

Knickarm-Industrieroboter zeichnen sich je nach Modell durch Wiederholgenauigkeiten in der Größenordnung von $\approx 0,1$ mm .. 1,0 mm aus. Das Anfahren einer absoluten Position ist etwa eine Zehnerpotenz ungenauer, da ein Roboter aufgrund seiner Bauart intrinsische Weichheiten aufweist, die sich beim Erreichen einer Absolutposition störend auswirken. Das Ausmaß des Fehlers hängt stark von der aktuellen Pose und dem Lastfall ab und ist nach Roboter individuell verschieden. Dies kann beim Tausch eines defekten Roboters oder bei der Offline-Programmierung durchaus problematisch werden, und daher bieten Roboterhersteller die Kalibrierung des Roboters nach speziell dafür entwickelten Verfahren an, wodurch die Absolutgenauigkeit deutlich erhöht werden kann (z. B. [44]). Voraussetzung für einen Zugewinn an Genauigkeit ist dann die korrekte Eingabe der sog. Lastdaten: am Greifer sowie auf Achse 3 oder 1 befindliche Massen müssen inklusive ihrer exakten Lage und Massenträgheitsmomente der Robotersteuerung mitgeteilt werden. Die Robotersteuerung trachtet nun danach, Einflüsse von Gravitation und Roboterbeschleunigung auf Basis eines proprietären Modells zu kompensieren. Im Rahmen dieser Arbeit wurde akribisch auf die Korrektheit dieser Daten geachtet, da vorangegangene Versuche gezeigt hatten, dass sich schnell ein Einfluss im mm-Bereich ergeben kann [45]. Auch mit Absolutkalibrierung und korrekten Lastdaten hängt die Absolutgenauigkeit vom exakten Anwendungsfall ab. Da im vorliegenden Fall Absolutgenauigkeit benötigt wird, wurde das System aus Roboter, Greifer mit Zuschnittserkennung und Aufnahmetisch mittels eines Leica-Lasertrackers [46] für den konkreten Anwendungsfall der Positionsbestimmung eines Zuschnitts aus 1 m Entfernung über einem gegebenen Aufnahmetisch mit anschließendem Greifen des Zuschnitts vermessen.

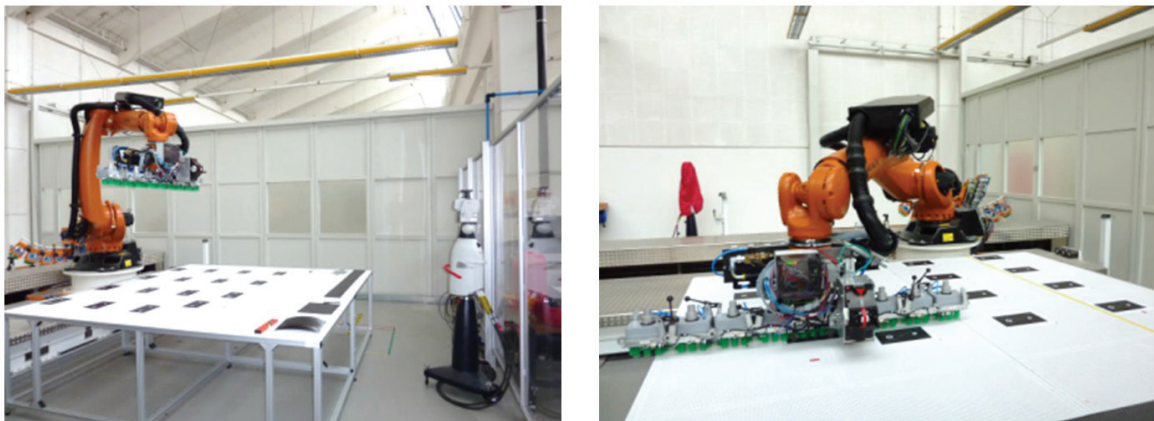


Abbildung 3.31: Anwendungsfall Autonomes Greifen

Wie in Abb. 3.31 gezeigt, wird der Roboter in die Aufnahmeposition 1 m über der Tischmitte bewegt und von dort auf einen 100 x 100 mm-Raster gelegenen Messpunkt gefahren. Das gesamte Messfeld hat eine Größe von 2,4 m x 1,4 m, was insgesamt 375 Messpunkten entspricht. Die vektoriellen Abweichungen von einem idealen 100 x 100 mm-Raster sind in Abb. 3.32 in 250-facher Vergrößerung dargestellt. Die Abweichungen liegen in diesem konkreten Fall zwischen 0,006 mm und 0,4 mm und betragen im Mittel $\mu=0,165$ mm bei einer Standardabweichung von $\sigma=0,076$ mm.

Vergleichsmessungen auf einer zweiten Roboterzelle ergaben bei ähnlicher Geometrie hinsichtlich Betrag und Standardabweichungen vergleichbare Werte. Messungen einzelner Ras-

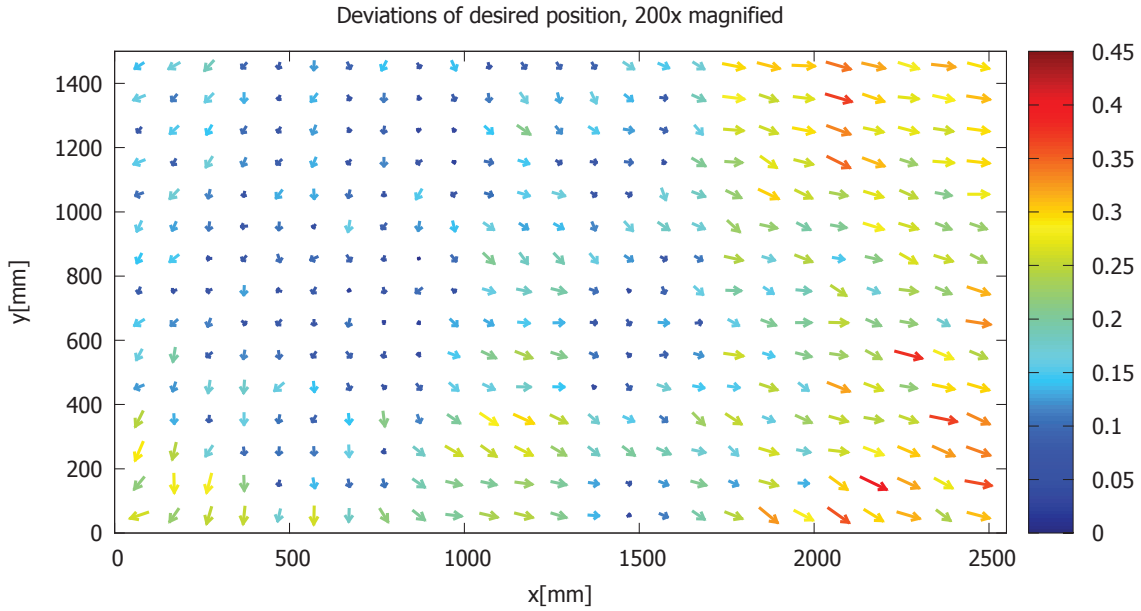


Abbildung 3.32: Experimentelle Daten für die Absolutgenauigkeit eines Roboters im Anwendungsfall „Autonomes Greifen“. Die Abweichungen liegen zwischen 0,006 mm und 0,4 mm und betragen im Mittel $\mu=0,165$ mm bei einer Standardabweichung von $\sigma=0,076$ mm.

terelemente zeigten abgesehen von gelegentlichen Ausreißern im Rahmen der Messgenauigkeit einen stetigen Verlauf der Messwerte zwischen den vier Eckpunkten hinsichtlich Betrag und Richtung bei guter Wiederholgenauigkeit der Messungen an den Eckpunkten (Abb. 3.33 und 3.34).

Die vektorielle Stetigkeit des Verlaufs ist hierbei von besonderer Bedeutung: nahe beieinander abgelegte Zuschnitte sollten, sofern sie nicht zu groß sind, auch gleichsinnige Fehler zeigen. Dies wirkt sich positiv auf den Anschluss benachbarter Zuschnitte, z. B. beim Ablegen auf Stoß oder auf die Genauigkeit der Ablage beim Stapeln auf benachbarte Punkte aus.

3.3.2 Reproduzierbares Anfahren der Messposition

Bei der Anfertigung der Aufnahmen für den Zuschnittserkennungsprozess wird der Roboterarm stets in dieselbe Position gebracht. Diese kann, wie durch Lasertrackermessungen nachgewiesen wurde, mit einer Wiederholgenauigkeit im Bereich von $15..20\mu\text{m}$ angefahren werden. Misst man von diesem Punkt aus ein festes Messtarget auf dem Tisch, so würde man zunächst erwarten, dass die Messergebnisse in einer ähnlichen Größenordnung liegen. In der Realität findet man allerdings deutlich erhöhte Werte. Um das beobachtete Verhalten näher zu untersuchen, wurden 16 Messtargets fest auf dem Aufnahmetisch platziert. In insgesamt 22 Messreihen wurde mit unterschiedlichen Anfahrparametern je zehnmal eine Fahrt von einer Ecke des Tisches in die Messposition mit anschließender Lagebestimmung der Targets durchgeführt, die mit einer Stillstandsmessung verglichen wurden. Dabei wurden die

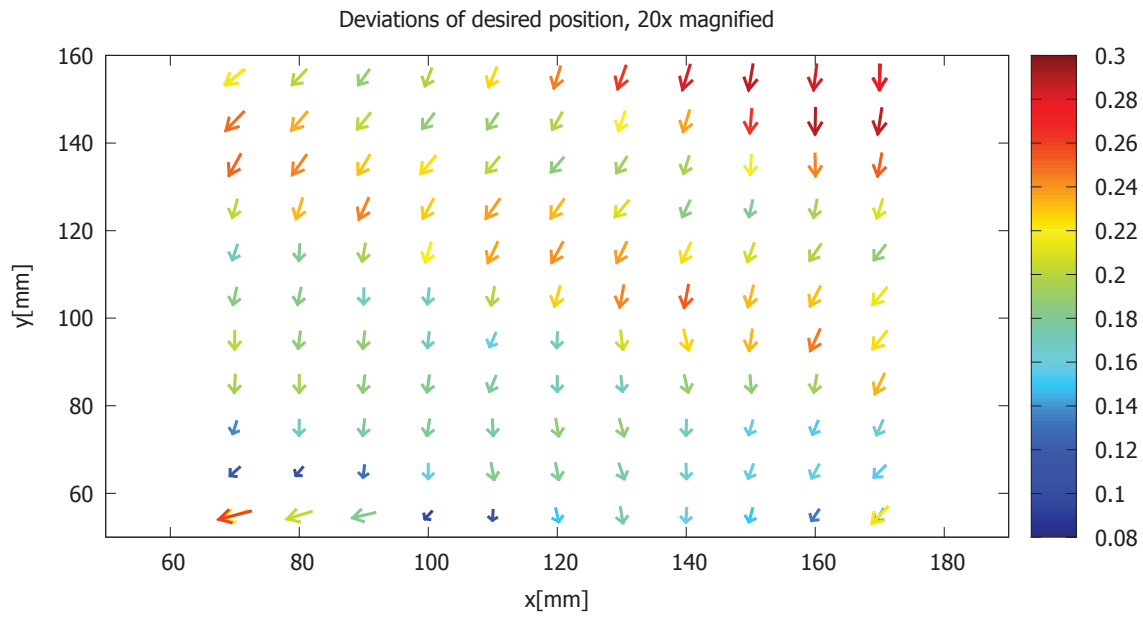


Abbildung 3.33: Anfahren von Positionen im feineren Raster, linke untere Ecke des Arbeitsbereichs: die Abweichungen der Eckpunkte zeigen gute Wiederholgenauigkeit, der vektorielle Verlauf zwischen den Ecken ist stetig.

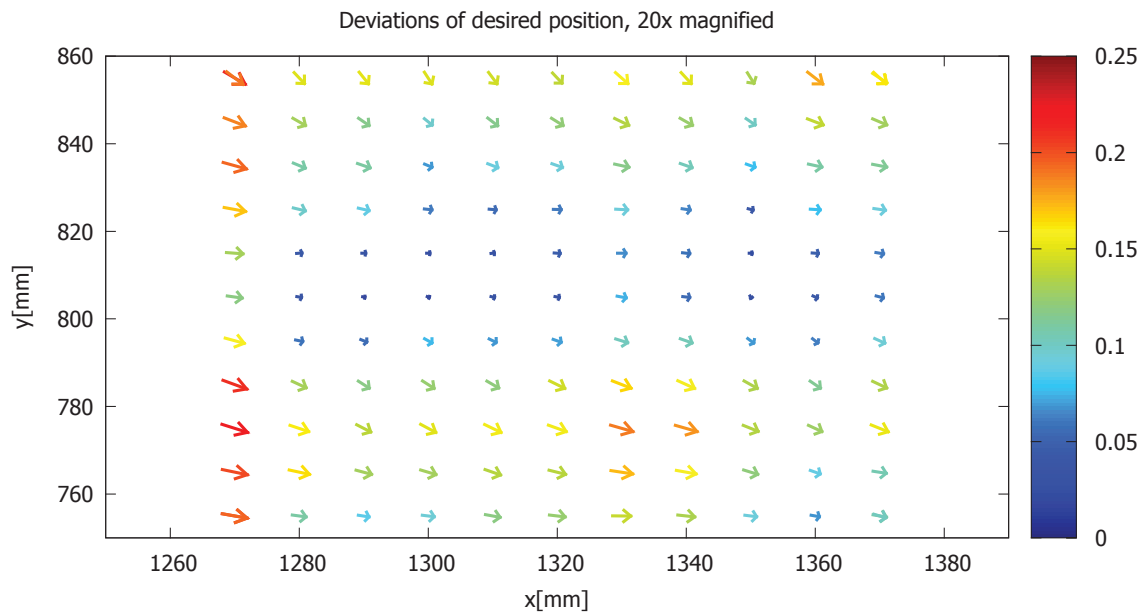


Abbildung 3.34: Anfahren von Positionen im feineren Raster, Mitte des Arbeitsbereichs: auch hier zeigen die Abweichungen der Eckpunkte gute Wiederholgenauigkeit und der vektorielle Verlauf ist stetig.

Bewegungsarten PTP¹⁷ und LIN¹⁸ bei unterschiedlichen Overrides¹⁹ und Beschleunigungsparametern (siehe dazu [33]) untersucht. Auch wurde testweise der TCP²⁰ vom Greifer in den Tisch verlagert, um eventuelle roboterinterne numerische Ungenauigkeiten auszuschließen. Es zeigte sich je Messreihe in den zehn Wiederholungen ein bei allen Targets jeweils tendenziell gleicher Verlauf der Messwerte mit einem Hub im Bereich von 0,1 .. 0,7 mm. Die Verläufe waren je Messreihe individuell und konnten nicht kausal zugeordnet werden. Auffällig war, dass häufig der erste Messwert besonders weit abwich, weswegen in späteren Versuchsreihen eine Leerbewegung beim Programmstart eingeführt wurde. Um den Einfluss der Anfahrparameter sichtbar zu machen, wurden für alle 16 Targets über die zehn Messungen die Standardabweichung der Position in x- und y-Richtung bestimmt. Im Anschluss wurde der Mittelwert dieser Standardabweichungen je Messreihe gebildet und aufgetragen (Abb. 3.35).

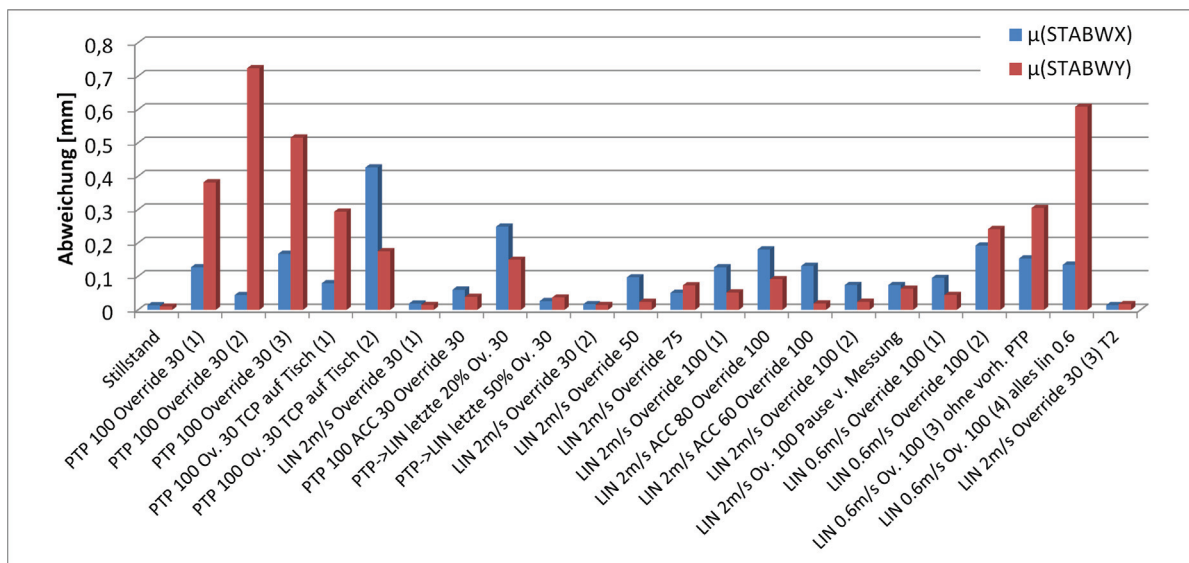


Abbildung 3.35: Einfluss von Anfahrsgeschwindigkeit, Beschleunigung und Bewegungsart

Auffällig neben der relativ starken Streuung bei den zehn Wiederholungen sind die im Vergleich zu PTP-Fahrten signifikant besseren Ergebnisse bei LIN-Fahrten. Über x- und y-Richtung gemittelt zeigt sich das beste Ergebnis mit 0,016 und 0,017 mm bei LIN-Bewegungen mit einer Verfahrgeschwindigkeit von 2 m/s bei einem Programmoverride von 30%. Dies ist sehr ähnlich zur Stillstandsmessung, bei der sich ein Wert von 0,012 mm ergab. LIN-Bewegungen mit einer Verfahrgeschwindigkeit von 0,6 m/s und einem Programmoverride von 100%, die rein rechnerisch die Selbe Verfahrgeschwindigkeit haben, zeigen mit 0,2 mm ein um den Faktor zehn schlechteres Ergebnis, was darauf hindeutet, dass die Anfahr- bzw. Abbremssequenz durch die Override-Reduzierung sanfter ausgeführt wird. Erhöht man bei $v=2$ m/s den Override auf 50, 75 und schließlich 100%, steigt der Mittelwert auf 0,09 mm an. Je nach Genauigkeitsanforderung im späteren Anwendungsfall sollte man also den Override auf 30% reduzieren, wobei für viele Anwendungen ein Override von 100% noch tolerabel ist. Die schlechtesten Resultate ergaben sich mit 0,3 und 0,4 mm bei PTP-Bewegungen mit

¹⁷Point-To-Point: Fahrt im Achsraum; alle Roboterachsen drehen sich gleichzeitig, die langsamste Achse führt. Nur die Ausgangs- und Endposition liegen fest, nicht aber der Pfad.

¹⁸Linearfahrt. Die Robotersteuerung berechnet über inverse Kinematik die Achsstellungen so, dass der TCP auf einer Geraden liegt.

¹⁹Die Override-Reduktion begrenzt global die Robotergeschwindigkeit.

²⁰Tool Center Point, Mittelpunkt des Werkzeugs

einem Override von 30%; auch ein Absenken des TCP auf den Tisch führte zu keiner Verbesserung. Der Override 100% wurde hierbei nicht mehr genauer untersucht, da bereits die Vorversuche Abweichungen im mm-Bereich gezeigt hatten. Als weiterer Ansatz wurde der Versuch unternommen, bei 30% Override die PTP-Bewegung in eine LIN-Bewegung hinein zu überschleifen, doch selbst bei Überschleifbeginn nach bereits der halben Bewegung konnten bei praktisch nicht mehr vorhandenem Zeitgewinn nicht die gleichen Werte wie bei einer reinen LIN-Bewegung erreicht werden.

Die Gesamtheit der o. g. Beobachtungen lässt den Schluss zu, dass die Anfahrgenauigkeit der Aufnahmeposition bei Weitem ausreicht, wohingegen die für eine hinreichend genaue Positionsbestimmung benötigte Winkeltreue nur mit besonderen Anfahrprofilen gehalten werden kann. Durch den Arbeitsabstand der Kamera von ≈ 1000 mm besteht ein erheblicher optischer „Hebel“, es gilt:

$$h \tan \Delta\phi = \Delta r \quad (3.21)$$

$$\Delta\phi = \tan^{-1} \frac{\Delta r}{h} \quad (3.22)$$

$$h = 1000 \text{ mm}, \Delta r = 1 \text{ mm} \Rightarrow \Delta\phi \approx 0.06^\circ \quad (3.23)$$

Eine Winkelabweichung von lediglich $0,06^\circ$ führt damit bereits zu einer Ortsabweichung von 1 mm auf dem Tisch. Im Sinne der Detektionsgenauigkeit sollte man sich also mit der Winkeltreue in der Größenordnung von $0,003^\circ$ bewegen, was die möglichen Anfahrprofile stark einschränkt. Um zu einer optimalen Prozessgeschwindigkeit zu gelangen ist es künftig sinnvoll, die Verfahrrparameter wie die Beschleunigung weiter zu untersuchen sowie auch weitere Parameter, wie z. B. die \$JERK-Struktur mit einzubeziehen. Da sich selbst in der Experten-Dokumentation [47] diesbezüglich keine Information findet und ja eine praktikable Lösung vorliegt, wurde beschlossen, die Verfolgung dieses Handlungsstrangs vorläufig auszusetzen.

3.3.3 Abgleich von Kamera- und Roboterkoordinatensystem

Wie in Abschnitt 3.2.1 gezeigt konnte mit unserem System eine befriedigende Genauigkeit nur unter Zuhilfenahme einer zusätzlichen, nicht in einer Fehlstellung der Kamera begründeten, Perspektivenkorrektur erreicht werden. Diese bedingt, wie auf S. 37 bereits gesagt, dass man sich auf einen fixen Arbeitsabstand festlegt, den man nicht mehr variieren kann. Damit kann der Koordinatenabgleich zwischen Kamera und Roboter auf den zweidimensionalen Fall reduziert werden. Da der Kalibrierung eine zentrale Rolle in Hinsicht auf die erzielbare Systemgenauigkeit zukommt und sie für jeden Greifer neu durchgeführt werden muss, wurden im Laufe der Zeit verschiedene Methoden angewendet und untersucht.

Der richtige Griff

Von essentieller Bedeutung für das System zum autonomen Greifen ist die möglichst exakte Übereinstimmung von angenommenem und realem TCP. Abb. 3.36 rechts zeigt, welche Probleme sich bei fehlerhafter TCP-Kalibrierung ergeben: Ohne Beschränkung der Allgemeinheit nehmen wir den korrekten TCP in der Mitte eines rechteckigen Zuschnitts an. Der Zuschnitt muss hier nach der Aufnahme durch den Greifer um 90° im Uhrzeigersinn gedreht werden. Bei fehlerbehaftetem TCP wird der Zuschnitt um den falschen TCP rotiert, was dazu führt, dass er in unserem Beispiel zu weit unten und zu weit rechts abgelegt wird. Im rechten Bild ist die korrekte Lage zur Orientierung gestrichelt dargestellt. Betrachtet man beliebige Winkel, so werden die Zuschnitte auf einem Kreis abgelegt, dessen Radius dem

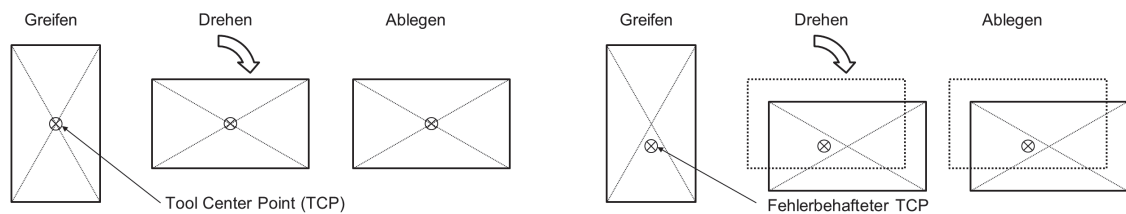


Abbildung 3.36: Der richtige Griff (links) und die Folgen des Fehlgriffs (rechts)

Abstand von realem und angenommenem TCP entspricht. Will man also präzise Ablegen, ist zuerst auch richtig zu greifen.

1-Punkt X-Y-Methode

Bei dieser ersten, einfachen Methode wird mit einer im TCP des Greifers befindlichen Messspitze manuell die Position eines Messtargets angetastet. Im Anschluss wird der Endeffektor unter Beibehaltung der x- und y-Position auf die Arbeitshöhe angehoben. Eine erste Detektion liefert nun die Translation des Ursprungs in beiden Koordinatensystemen. Durch zwei weitere Detektionen nach jeweiligem Bewegen um 100 mm in die positive x- und y-Richtung kann der Rotationswinkel zwischen beiden Koordinatensystemen ermittelt werden (Abb. 3.37).

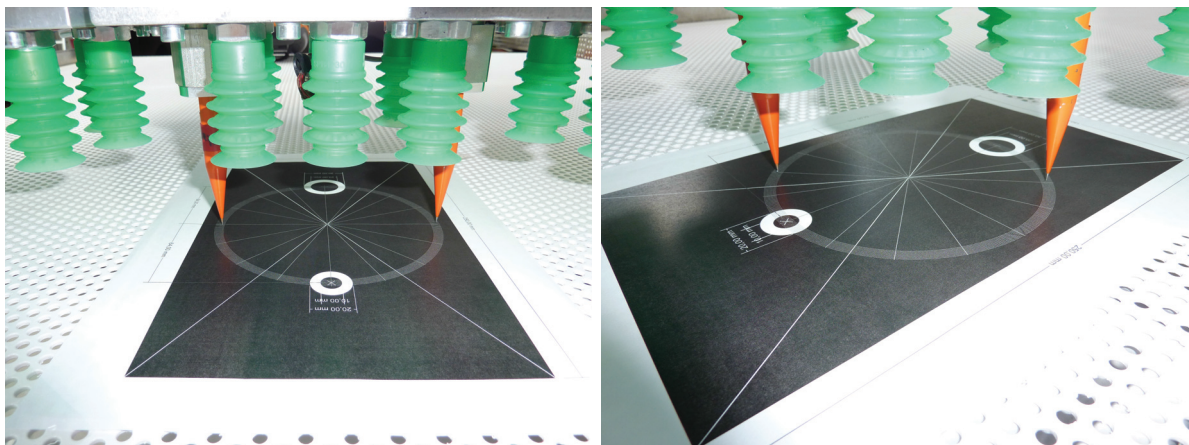


Abbildung 3.37: Kalibrierung mit der 1-Punkt x-y-Methode

Dabei ergeben sich folgende Schwierigkeiten:

- Am Greifer befindet sich kein Konstruktionsmerkmal, um eine Messspitze genau aufzunehmen.
- Die vorhandenen Messspitzen besitzen lediglich ein M8-Gewinde ohne Zentrierkonus und werden über Adapter in die Saugergewinde geschraubt.
- Am Greifer befindet sich kein Referenzpunkt für den TCP. Als TCP wurde daher der Durchstoßpunkt der z-Achse des Flansches durch die Saugerebene gewählt.
- Dieser ausgezeichnete Punkt ist aufgrund diverser aufeinandergesetzter Zwischenstücke, die alle laut Zeichnung nicht toleriert sind, bestenfalls in der Vorstellung vorhanden.

- Es wurde mit hohem Zeitaufwand und mäßigem Erfolg versucht, zwei Messspitzen, die zumindest in der Theorie symmetrisch zum TCP auf der y-Achse des Greifers um ca. 30 mm in die z-Richtung verschoben liegen sollten, durch Drehen auf einem auf dem Target befindlichen Kreis zu halten.

Es lässt sich festhalten, dass die über ein normales Teachin des Roboters hinausgehende Verwendung des Greifers bei der Greiferkonstruktion noch nicht vorgesehen war und nun ein Problem darstellt. Als Fazit bleibt: der TCP kann nicht hinreichend genau angetastet werden. Daher ist es sinnvoll, weitere Kalibrierverfahren zu untersuchen, die möglichst ohne die Verwendung von Messspitzen auskommen.

Tracker-Target-Methode

Ein wesentlicher Nachteil der 1-Punkt X-Y-Methode ist die starke Abhängigkeit von der genauen Bestimmung des Ursprungs, die wiederum von einem genau definierten, tastbaren TCP abhängt. Ein integratives Verfahren, das mittels flächig auf dem Tisch aufgenommenen Wertpaaren in beiden Koordinatensystemen eine für die Gesamtheit der Punkte optimale Transformation ermittelt, könnte hier im Vorteil sein. Ein probates Mittel zur Kalibrierung und hochgenauen Vermessung stellt ein Lasertracker [46] dar. Es sollte nun möglich sein, nach Abgleich von Roboter- und Trackerkoordinatensystem diese Wertepaare zu ermitteln und nun eine Transformation gemäß:

$$\vec{x}_T = \vec{c} + \mu \bar{R} \vec{x} \quad (3.24)$$

diese Transformation wird Helmert-Transformation [48] genannt. Der Vektor \vec{x} wird mittels der Rotationsmatrix \bar{R} gedreht und um den Faktor μ skaliert. Durch Translation um \vec{c} ergibt sich der transformierte Vektor \vec{x}_T . \bar{R} kann nach beliebiger Konvention auf drei Eulerwinkel α, β, γ zurückgeführt werden, und somit sind insgesamt sieben Parameter z. B. mittels Least-Squares-Fit aus den Wertepaaren zu bestimmen.

Um diese Wertepaare zu erhalten wird eine Aufnahmeplatte gefertigt, die optisch den im vorangegangenen Abschnitt verwendeten Kameratargets gleicht, aber zusätzlich ein Magnetnest für den Retroreflektor des Lasertrackers trägt (Abb. 3.38 links). Die Platte kann auf dem Aufnahmetisch beliebig verschoben werden und man bekommt so schnell Wertepaare für den Fit.

Ungünstigerweise werden die Werte für die Roboterposition im Basiskoordinatensystem des Aufnahmetischs für das eingesetzte Greifertool benötigt, so dass auch hier der TCP des Greifers einzumessen ist, obwohl dies konstruktiv nicht vorgesehen ist. Eine Möglichkeit zur Bestimmung des Greifer-TCPs ist in Abb. 3.38 rechts skizziert. An einer beliebigen außermittigen Stelle des Greifers wird ein Trackernest angebracht. Der Greifer wird um seine z-Achse gedreht und die Werte mit dem Tracker aufgenommen. Der TCP liegt dabei auf der Mittelsenkrechten des sich ergebenden Kreises. Um auch die Lage auf der Mittelsenkrechten zu bestimmen kann der Greifer im Tool-Koordinatensystem um eine andere Achse um den TCP verkippt werden, woraus sich nach Wiederholung der Drehung um z eine zweite Mittelsenkrechte ergibt, die die erste im TCP schneiden sollte. Danach ist noch der Koordinatenabgleich zwischen Tracker und Roboter z. B. durch Verfahren entlang der Koordinatenachsen durchzuführen, wobei der eben bestimmte TCP zu berücksichtigen ist. Das Verfahren hat also die folgenden Stärken und Schwächen:

- Da das Verfahren integral arbeitet, kann die benötigte Transformation aus sehr vielen Werten gewonnen werden, wodurch sich die Genauigkeit erhöht und man weniger Gefahr läuft, dass die Transformation von punktuellen Abweichungen dominiert wird.

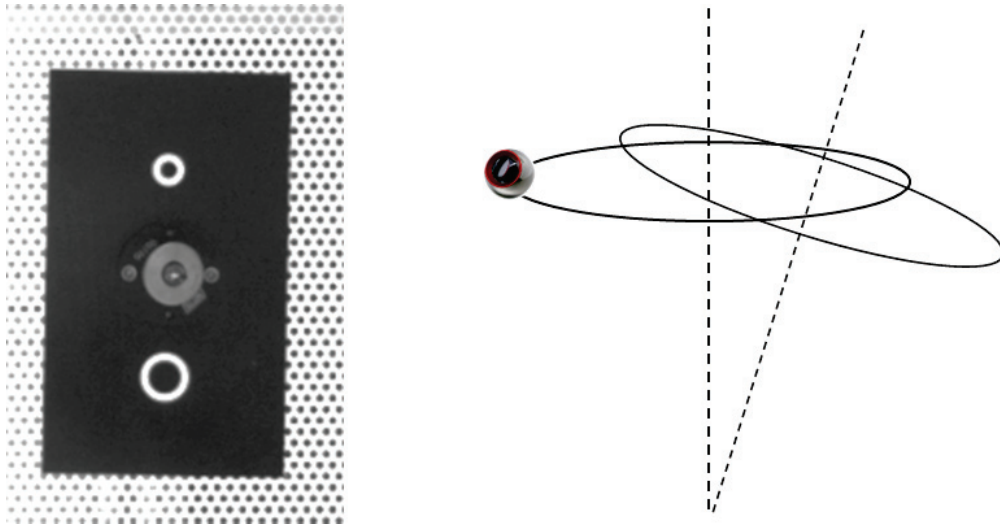


Abbildung 3.38: Kalibrierung mit der Tracker-Target-Methode

- Der Verfahrensvorteil durch den Zeitgewinn der gleichzeitigen Aufnahme in zwei Koordinatensystemen wird durch die benötigten Vorarbeiten zum Einmessen des TCP anihiliert.
- Mehrfache Wiederholungen der TCP-Bestimmung lassen die Schätzung zu, dass der TCP nicht viel genauer als 0,5..1 mm bestimmt werden kann. Die Gesamtgenauigkeit des Verfahrens ist somit nicht gegeben, da der TCP nicht mit dem Lasertracker direkt angetastet werden kann.
- Da das Verfahren bis auf eine Verschiebung im mm-Bereich in sich stimmig und genau ist, kann der TCP experimentell nachkorrigiert werden, indem man sich das in Abb. 3.36 gezeigte Verhalten zunutze macht. Eine Serie von Targets, in unterschiedlichen Winkeln auf dem Aufnahmetisch platziert, werden autonom gegriffen und aufeinander ablegt; durch Messung mit dem Kamerasystem wird der Kreisradius bestimmt. Mittels iterativer Abstimmung des TCP in Verbindung mit je einem Ablageversuch kann, wie in Abschnitt 3.4.1 noch gezeigt werden wird, schließlich eine befriedigende Genauigkeit erreicht werden.

Tracker-Fixtargets-Methode

Nimmt man in Kauf, dass in den Ecken des Aufnahmetischs Kameratargets angebracht werden, die auch eine Körnung für den Tastkopf des Lasertrackers haben (Abb. 3.39), lässt sich das Kalibrierverfahren vereinfachen. Die Targets wurden in unserem Fall außerhalb der Tischfläche angebracht, um den Benutzer daran zu hindern, sie später mit Zuschnitten abzudecken. Die Körnungen können nun mit dem Lasertracker und die Targets mit der Kamera simultan gemessen werden, wodurch der Koordinatenabgleich leicht vorgenommen werden kann. Diese zunächst einfach scheinende Idee bringt ihre eigenen speziellen Aspekte mit sich:

- Durch das Verfahren kann trotzdem nicht vermieden werden, das Koordinatensystem des Lasertrackers mit dem Basiskoordinatensystem des Tisches abzugleichen. Das bedeutet: Einmessen einer Messspitze, Einmessen der Tisch-Base durch Antasten der Kör-

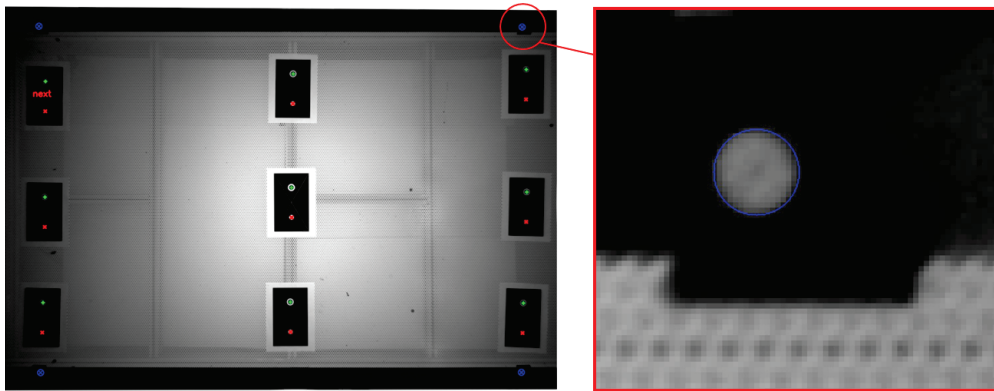


Abbildung 3.39: Kalibrierung mit der Fix-Target-Methode. In der Ausschnittvergrößerung rechts ist das Target und andeutungsweise die Körnung in der Mitte des weißen Kreises zu sehen.

nungen mit der Messspitze (beides beschrieben in [33]), Aufnahmen der vier Tracker- und Roboterkoordinatenpaare.

- Hier ergibt sich die erste Schwierigkeit: Die vier Werte liegen nicht in einer Ebene. Durch Feinjustage der Tischfüße kann dies in gewissem Rahmen beeinflusst werden, jedoch bleiben durch das Antasten eingebrachte Ungereimtheiten in der Lage der Punkte - es ist keine befriedigende Übereinstimmung zu erreichen.
- Infolgedessen und auch aufgrund der Tatsache, dass die Kamerakalibrierung am Bildrand eher als unbefriedigend zu bezeichnen ist (vgl. 3.2.1), ist die o. g. Helmert-Transformation nicht zielführend, da sich Abweichungen im mm-Bereich ergeben.
- Als besser geeignet erwies sich eine perspektivische Korrektur, die die vier Punkte aufeinander abbildet und die Abweichungen vergleichmäßigt. Dieses Verfahren kann, wie in Abschnitt 3.4.4 noch gezeigt werden wird, auch zur Kompensation von Systemabweichungen verwendet werden.
- Auch hier wiederholt sich das im letzten Abschnitt genannte Verhalten der letztlich nicht exakten Kenntnis des TCP, das über eine experimentelle Korrektur beseitigt werden muss.

Vierpunkt-Methode

Zur Vereinfachung des Verfahrens wurde ein Weg gefunden, den Lasertracker aus der Messung zu eliminieren: Drei der vier Kameratargets werden mit der Messspitze angetastet, um die Roboterbase zu teachen (Abb. 3.40 links). Der vierte Punkt wird zusätzlich angetastet, um genügend Punkte für die oben erwähnte perspektivische Transformation zwischen Base-Koordinatensystem des Roboters und Kamerakoordinatensystem zu erhalten. Die Position der Punkte beim Teachvorgang wird im globalen World-Koordinatensystem des Roboters aufgenommen. Um die Punkte in der nun eingemessenen Base zu erhalten, kann man sie entweder transformieren oder schlicht ein zweites Mal im World-Koordinatensystem anfahren, den Roboter stoppen, das Bezugskoordinatensystem kurz auf die soeben eingemessene Base wechseln und die Werte notieren. Anschließend bringt man den Roboter in die spätere Aufnahme-Position und misst die Positionen der vier Targets im Kamerakoordinatensystem. Es

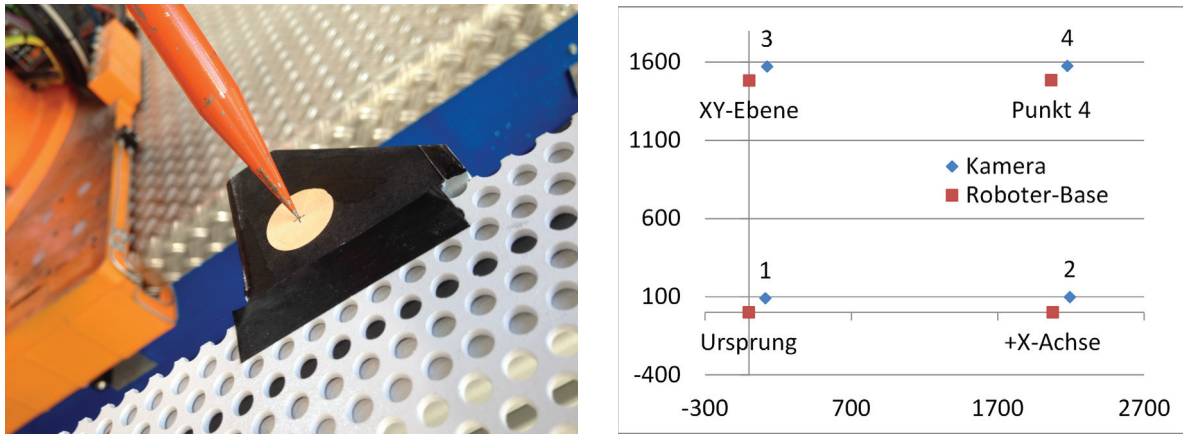


Abbildung 3.40: Kalibrierung mit der Vierpunkt-Methode

ergeben sich die in Abb. 3.40 rechts gezeigten vier Punktpaare, durch die die perspektivische Transformation mittels des in [49] beschriebenen Funktionsaufrufs von **find_homography** ermittelt werden kann. Zusammengefasst ergibt sich folgendes Bild:

- Hauptvorteil der Methode ist, dass kein Lasertracker benötigt wird. Die experimentellen Ergebnisse unterscheiden sich dabei nicht erkennbar von den mit der Tracker-Fixtargets-Methode erzielten.
- Die Zeit für die Einmessung wird deutlich reduziert.
- Es wird kein Referenzpunkt am Greifer benötigt.
- Wie bei den oben beschriebenen Methoden wird die Transformation über eine experimentelle Feinkorrektur nachjustiert.

Somit ist die Vierpunkt-Methode die schnellste und effizienteste Methode zum manuellen Einmessen der Basis.

Fixpunkt-Methode

Wie in Abschnitt 3.4 gezeigt werden wird, gibt es für längere Versuchsreihen den Bedarf nach schneller Kontrolle und Nachjustierung der Kalibrierung. Da mit dem Zuschnittserkennungssystem bereits ein Messsystem vorhanden ist, sollte die Eignung für diesen Einsatzzweck näher untersucht werden. Ausgangspunkt der Überlegung ist der folgende: bringt man den Greifer mit seinem TCP exakt über ein Target und rotiert um seine z-Achse, so stellt das Target auf allen Aufnahmen einen Fixpunkt dar - das gesamte Bild rotiert um das Target. Wird das Target nicht exakt mittig mit der z-Achse getroffen, so präzediert es um den TCP (Abb. 3.41). Dieses Verhalten lässt sich nutzen: Nach Anfahren der bekannten Lage des Targets im Roboterkoordinatensystem wird das Target unter Drehung des Endeffektors um die z-Achse vermessen. Im Kamerasystem ergibt sich ein Kreis, dessen Radius durch Kreisannäherung [50] ermittelt werden kann. Wechselt man nun ins Roboterkoordinatensystem und trägt diesen Kreis an der Messposition an, so liegt der TCP auf eben diesem Kreis. Führt man das Verfahren nun an insgesamt drei leicht unterschiedlichen Messorten durch, so liegt -zumindest in der Theorie- der wahre TCP auf dem gemeinsamen Schnittpunkt der drei erhaltenen Kreise. Numerische Ungenauigkeiten führen dabei nur zu nahe beieinander liegenden Punkten, doch dies kann durch Mittelung einfach behoben werden. Letztlich kann

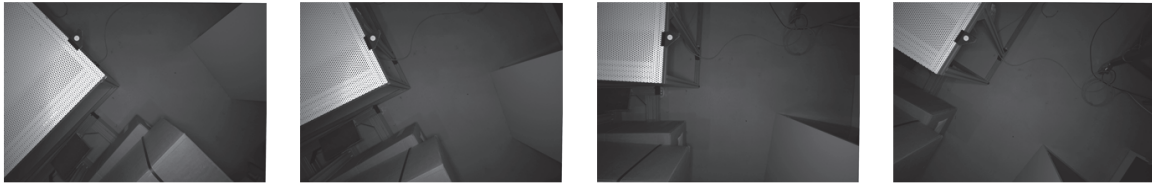


Abbildung 3.41: Bei Drehung um die z-Achse rotiert das Bild um den TCP.

noch eine Verifikationsmessung durchgeführt werden, die Aufschluss über die Genauigkeit der TCP-Bestimmung gibt: man rotiert um den neu berechneten Punkt, Ziel ist ein Kreis mit Radius Null. Die Ergebnisse von acht Testläufen sind in Abb. 3.42 gezeigt.

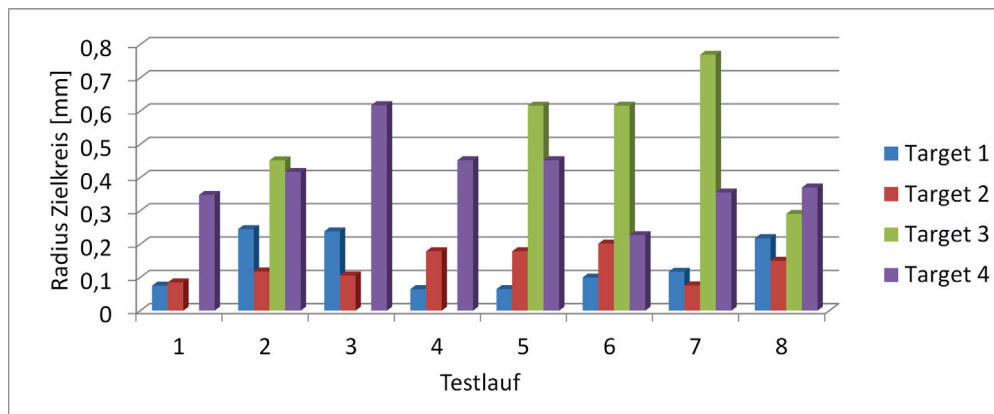


Abbildung 3.42: Ergebnisse der TCP-Bestimmung über die Fixpunkt-Methode

Das Ergebnis ist zweigeteilt: Für Targets 1 und 2, bei deren Messung der Roboter eine günstige Pose einnimmt, ergeben sich in allen acht Versuchen Werte zwischen 0,065 und 0,245 mm Endkreisdurchmesser. Da die Messgenauigkeit schwankt und bereits ein fehlerhafter Messpunkt den Radius stark in die Höhe treibt, ist es mit der geringen Anzahl der Messungen nicht möglich, dies zu diesem Zeitpunkt genauer zu quantifizieren. Auch fand gleichzeitig zum Versuch ein Hallenumbau statt, und die Versuche wurden notgedrungen inmitten von diversen Störquellen durchgeführt, was der Messgenauigkeit allgemein nicht zuträglich ist. Auffällig ist, dass die beiden roboterfernen Punkte 3 und 4 deutlich schlechtere Ergebnisse zeigen. Neben des ungünstigen Einflusses der Pose kommt noch etwas hinzu: Der am verwendeten Roboter montierte Kabelschlepp ist mit einer Rückzugsvorrichtung ausgestattet. Beim Überschreiten von gewissen Winkelstellungen „schnappt“ der Schlepp über das Roboterhandgelenk. Die Rückzugsvorrichtung zieht nun den Schlepp ruckartig ein und verursacht dabei sicht- und in Form von Antriebsgeräuschen auch hörbare Positionsschwankungen der Roboterhand. Weiterhin bedeutet das, dass trotz zweier sehr gut messbaren Punkte durch die mangelhafte Ermittlung der beiden roboterfernen Punkte mit dieser Methode sicher auch nicht hochgenau kalibriert werden kann. Mögliche Alternativen könnten neben der ursächlichen Beseitigung des Problems durch Änderung des Kabelschlepps in der geeigneten Verlegung der Messtargets verbunden mit vorteilhafter Wahl des Ursprungs und der Achsen gefunden werden. Alternativ könnte die Base des Aufnahmetischs erst manuell mit der oben beschriebenen Vierpunktmethode eingemessen werden, wobei man Ursprung und X-Achse auf die gut messbaren Targets 1 und 2 legt; im weiteren Verlauf würde nur anhand dieser zwei Punkte das Koordinatensystem im Stundentakt um Translation und Rotation um die z-Achse nachkorrigiert werden.

Vergleich der Methoden, Methodenauswahl

Als Fazit für die lasertrackerbasierten Methoden lässt sich festhalten, dass die Genauigkeit des Lasertrackers nicht zur beliebigen Genauigkeitssteigerung der Kalibrierung genutzt werden kann - der Koordinatenabgleich zwischen Roboter und Lasertracker kann dafür nicht mit der benötigten Genauigkeit durchgeführt werden. Prinzipiell ist dieser Abgleich für alle Legeaktivitäten mit Robotern unabdingbar, da jegliche CAD-basierte Produktion nur dann möglich wird, wenn die Koordinatensysteme stimmig aufeinander abgeglichen werden. Somit kann für künftige Projekte nur angeraten werden, diese Arbeiten auf eine breitere Basis zu stellen, den Erkenntnisgewinn voranzutreiben und die Roboterzellen und Greifer mit antastbaren Referenzpunkten auszustatten. Es konnte gezeigt werden, dass man auf mehrere Arten mit relativ hohem Aufwand eine befriedigende Kalibrierung erreichen kann, aber niemals mit dem Lasertracker allein; mehr Information hierzu findet sich in Abschnitt 3.4.1. Zum Einsatz in den Legeversuchen kamen im Laufe der Zeit alle genannten Verfahren, die sich nach der stets benötigten manuellen Nachkalibrierung durch Ablegen von Testmustern in der erzielten Genauigkeit nicht mehr nennenswert unterscheiden. Die im Versuchsbetrieb am DLR auftretenden Probleme durch ständig wechselnde Greifer und Roboterzellen bedingen, dass die Kalibrierung häufig stattfinden muss und so im täglichen Betrieb zeitkritisch wird. In einem späteren Produktionsumfeld hingegen kann man auf weniger variable Randbedingungen und damit weniger häufig auftretende Notwendigkeit zur Kalibrierung hoffen. Es stellt sich somit die Frage, wie viel Aufwand zur Entwicklung automatischer Kalibrierverfahren sinnvoll und gerechtfertigt ist. Auch ist die Frage gerechtfertigt, wie hoch die Genauigkeit für den Anwendungsfall überhaupt sein muss, mehr hierzu findet sich in Abschnitt 4.

Aufgrund der einfachen und schnellen Durchführung ohne zusätzliches Equipment ist der Vierpunktmethode derzeit klar der Vorzug zu geben; eine dynamische Nachjustierung im Stundentakt mit der Fixpunktmethode kann zusätzlich erfolgen. Bei einem Einsatz in größerem Maßstab, z. B. bei größeren Bauteilen, stellt sich die Frage nach der Einmessung von mehreren Bases zur Ablage, wofür die Fixpunktmethode weitere Verwendung finden könnte.

3.4 Systemtests

Bereits bei der Systemauslegung wurde begonnen, Möglichkeiten der Systemvalidierung hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeiten zu suchen. Es zeigte sich, dass man entsprechend genaue Messungen wiederum nur mit einem optischen System durchführen kann, das sich auf am Greifobjekt angebrachte Referenzpunkte bezieht (z. B. Photogrammetrie). Da die Zuschnittslage beim Greifen undefiniert ist kann man sich hier auf die Reproduzierbarkeit des Messwertes beschränken (vgl. auch 3.3.2), wohingegen für das Ablegen die Position bekannt ist und eingehalten werden muss. Nach anfänglichen Tests zur Reproduzierbarkeit der Messung entstand die Idee, die Messung nicht mit einem externen Photogrammetriesystem, sondern mit dem Kamerasystem selbst durchzuführen. Da hierbei jenseits den in den Abschnitten 3.2.1 und 3.3.1 untersuchten Systemgenauigkeiten keine Absolutwerte bekannt sind, muss man das Testverfahren so wählen, dass diese für den Test selbst nicht benötigt werden.

3.4.1 Systemvalidierung anhand von Testmustern

Zur Untersuchung der Genauigkeit des Gesamtsystems wurden zahlreiche Versuche mit Testmustern durchgeführt. Diese wurden auf A4-Papier aufgedruckt, sind gegenüber CFK-Zuschnitten sehr preiswert, nutzen sich nicht ab und bieten den Vorteil, dass sie nach der Ablage präzise gemessen werden können. Je neun bzw. 16 Testmuster unterschiedlicher Position und Ausrichtung wurden gegriffen und auf einen Zielpunkt abgelegt, der Versuch in mehreren Testreihen jeweils mehrfach wiederholt. Für die Messung wurde das Kamerasystem selbst unter Kenntnis der Genauigkeiten aus Abschnitt 3.2.1 und 3.3.1 verwendet. Wie auf S. 54 gezeigt ist ein zusätzlicher Einfluss einer eventuell ungenauen Kalibrierung beim Drehen des Greifers zu erwarten, daher wurden im ersten Schritt Targets von identischer Orientierung autonom gegriffen und abgelegt (Abb. 3.43). Das Ergebnis ist in Abb. 3.44 gezeigt²¹.

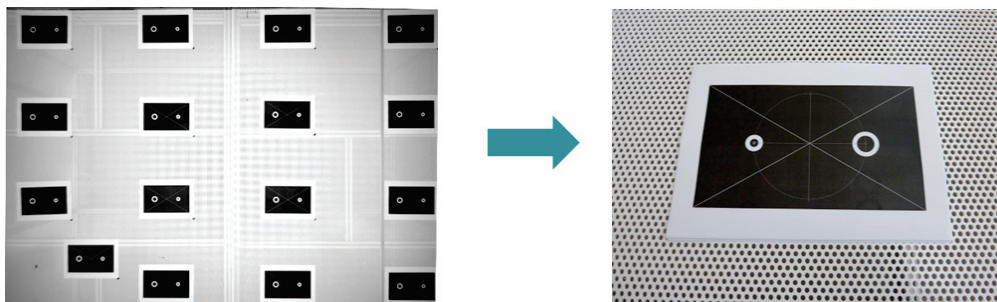


Abbildung 3.43: Reproduzierbarkeit Schritt 1: fester Greifwinkel

Es ist eine relativ hohe Gesamtabweichung im Bereich von ± 5 mm zu verzeichnen. Die Standardabweichungen in beide Achsrichtungen sind ebenfalls hoch und betragen $\sigma_x=1,7$ mm und $\sigma_y=1,0$ mm. Auffällig ist die hohe Reproduzierbarkeit des Kurvenverlaufs sowie die mit einer eindeutigen Ortsabhängigkeit verbundene Stabilität der Ablage. Berücksichtigt man die Ergebnisse aus Abschnitt 3.2.1, so ist der nächste Schritt naheliegend: ausgehend von einem Übersichtsbild wird die Kamera mit dem Roboter so verfahren, dass sie mittig über dem ersten Messpunkt steht. Dann wird eine zweite Aufnahme angefertigt, bei der das Kamerasystem im Arbeitspunkt betrieben werden kann, wodurch die Genauigkeit deutlich verbessert wird. Abb. 3.45 zeigt die Verbesserungen im selben Maßstab wie Abb. 3.44.

²¹Auftragung im Kamerakoordinatensystem, y-Achse zeigt nach unten

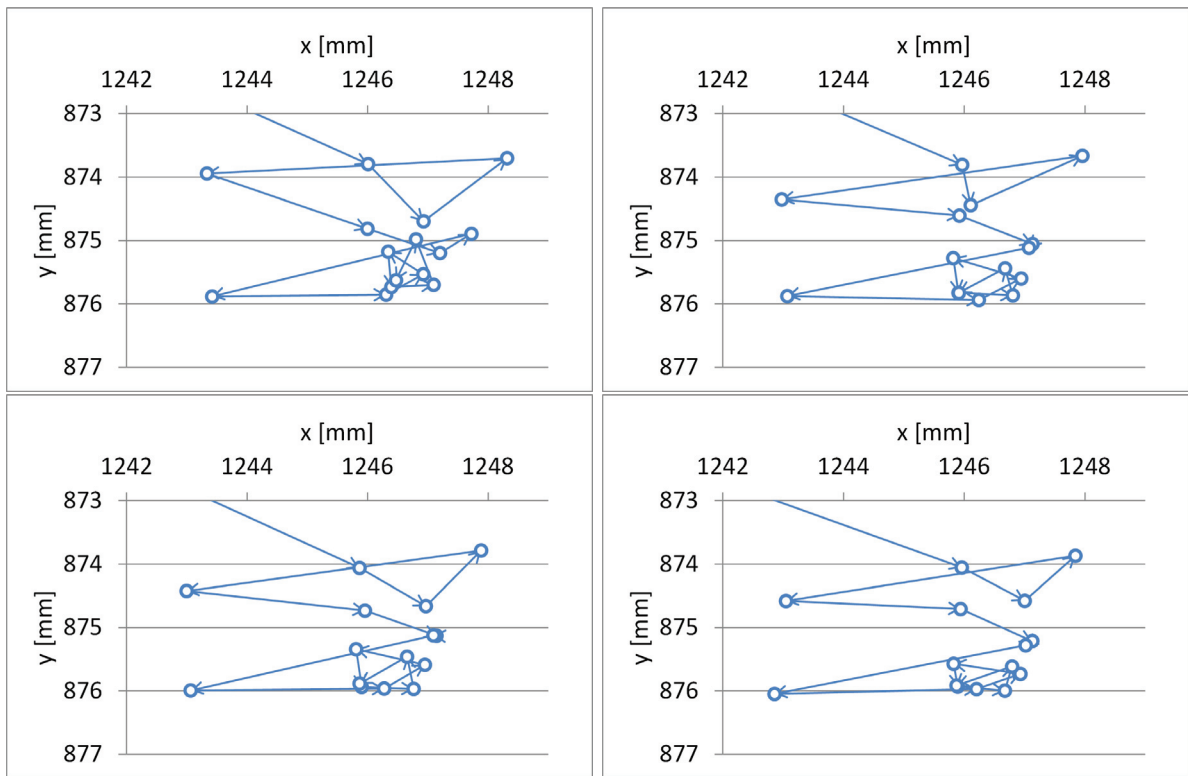


Abbildung 3.44: Ablage von Testmustern nach einer Einzelaufnahme

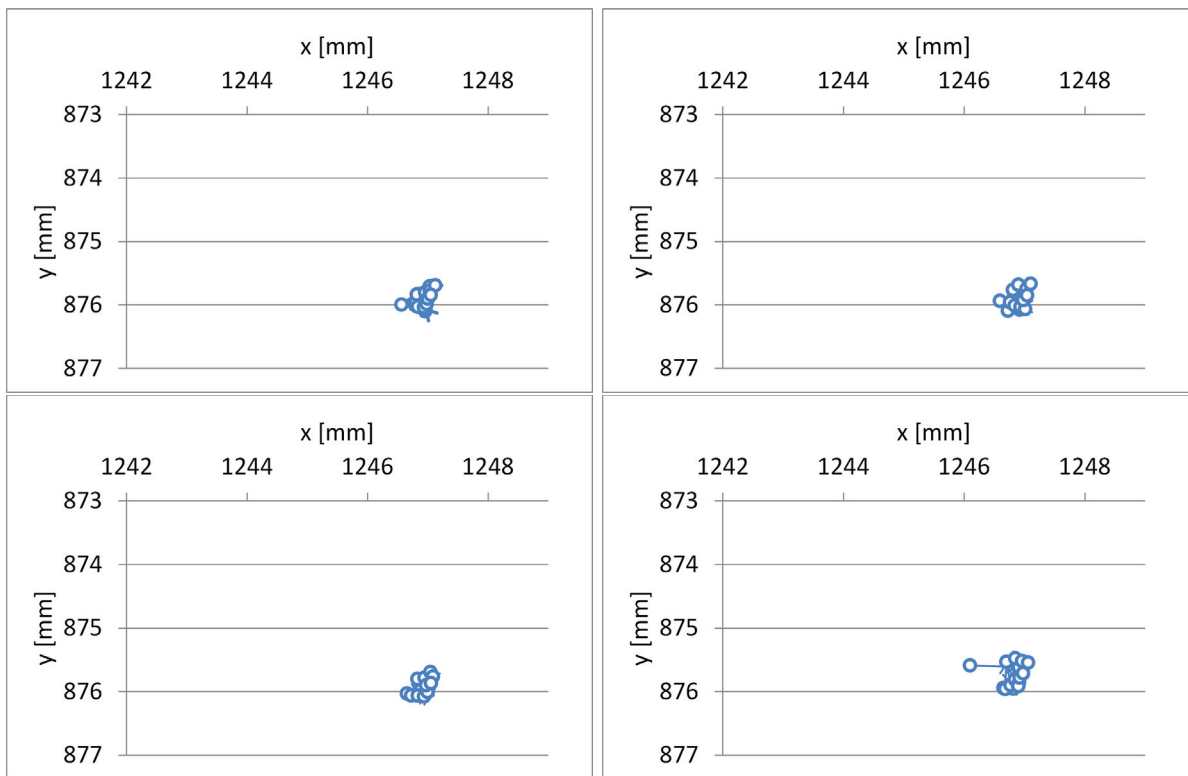


Abbildung 3.45: Ablage von Testmustern nach einer zweiten Aufnahme im Arbeitspunkt

Durch die zweite Aufnahme im Arbeitspunkt kann die Gesamtabweichung um etwa eine Zehnerpotenz auf $\pm 0,60$ mm reduziert werden, auch die Standardabweichungen reduzieren sich deutlich auf $\sigma_x=0,17$ mm in der x- und $\sigma_y=0,16$ mm in der y-Richtung. Die Vorgehensweise ist im Sinne der Genauigkeit also zu empfehlen. Wichtig ist dabei, die in Abschnitt 3.3.2 festgelegten Anfahrbedingungen (LIN-Bewegung mit $v=2$ m/s, Programmoverride 30%) einzuhalten.

Im nächsten Schritt ist zu untersuchen, welcher Einfluss sich bei der Ablage von mit variablem Winkel gegriffenen Testmustern ergibt. Dazu werden insgesamt neun Testmuster mit unterschiedlichen Winkeln ausgelegt und analog zum vorangegangenen Versuch autonom zu einem Stapel verarbeitet (Abb. 3.46).

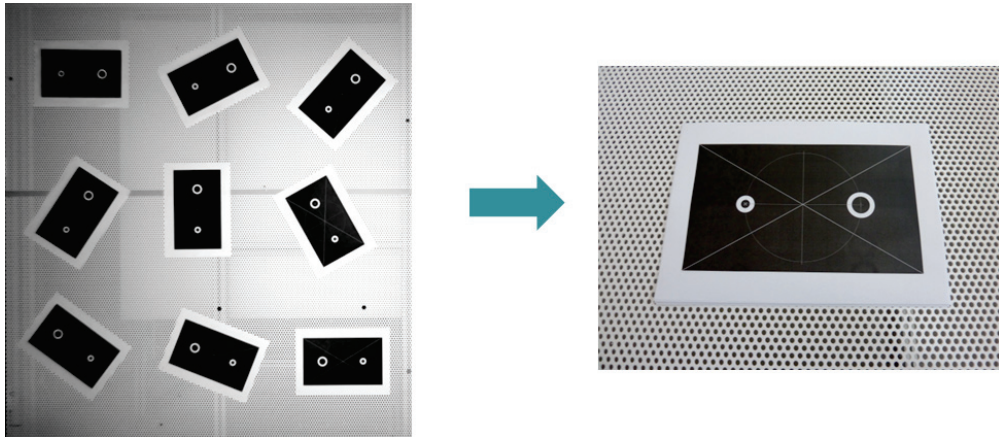


Abbildung 3.46: Reproduzierbarkeit Schritt 2: variabler Greifwinkel

Wie in Abschnitt 3.3.3 eingangs erwähnt ist nun zu erwarten, dass, sofern der TCP nicht ideal bestimmt wurde, die Positionen der abgelegten Testmuster auf Kreisen liegen, deren Radien dem Abstand des TCP vom Idealwert entsprechen (Abb. 3.47 links). Das Verfahren ist ähnlich zur in 3.3.3 beschriebenen Fixpunkt-Methode. Die Kreise wurden hier jeweils mittels Least-Squares-Fit bestimmt; alternativ ist auch eine Kreisanpassung [50] möglich. Durch iterative Anpassung des TCP mit dem Ziel einer Kreisgröße von Null kann der Idealwert des TCP bestimmt werden. In der Ausschnittvergrößerung in Abb. 3.47 rechts ist erkennbar, dass zu kleinen Kreisradien hin die Bestimmung aufgrund der Prozesstoleranzen ungenau wird, da die Messpunkte nicht mehr exakt genug auf Kreisen liegen.

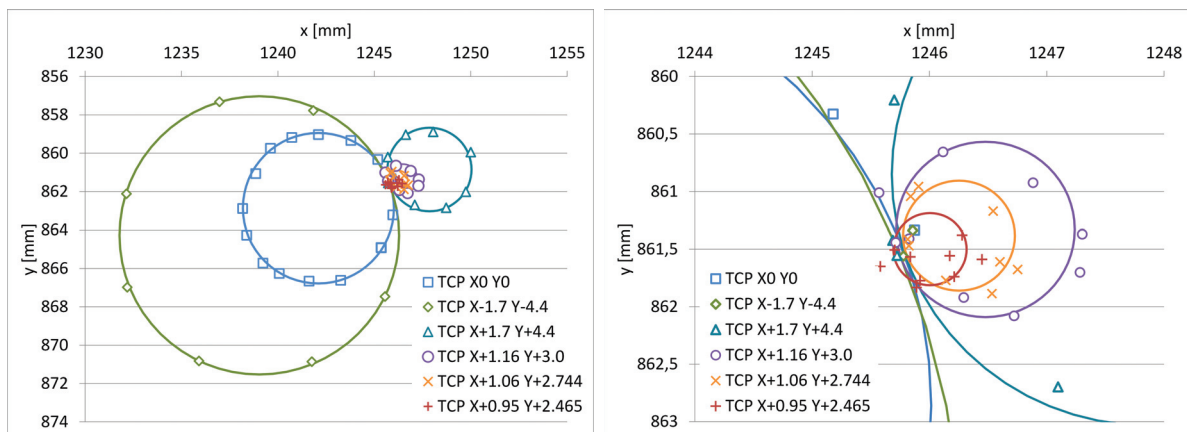


Abbildung 3.47: Ablageergebnisse bei Variation des TCP Rechts: Ausschnittvergrößerung.

Unter Berücksichtigung dieser Fakten wurde eine TCP-Korrektur von $\Delta_x = 0,95$ mm und $\Delta_y = 2,465$ mm als optimal akzeptiert. Mit diesem optimierten TCP konnte eine maximale Positionsdivergenz von $\pm 0,71$ mm bei einer Standardabweichung von $\sigma_x = 0,26$ mm in der x- und $\sigma_y = 0,18$ mm in der y-Richtung erreicht werden, was ähnlich zu den bei festem Greifwinkel erzielten Ergebnissen ist (Tab. 3.2). Der ursprüngliche TCP wurde mit der Tracker-Target-Methode (Abschnitt 3.3.3) bestimmt. Die nun experimentell ermittelte Anpassung im Bereich von 2,6 mm bestätigt die Schwächen des Verfahrens.

Bei einem Wiederholversuch auf einer zweiten Roboterzelle ergaben sich um den Faktor zwei bis drei schlechtere Werte für die Standardabweichungen der Ablagepositionen. Es stellte sich heraus, dass dieser Roboter nicht vom Hersteller absolutvermessen war (vgl. 3.3.1) und daher bei der zweiten Aufnahme (vgl. 3.4.1) nicht genau senkrecht über dem ersten Messpunkt stand. Nach Durchführung der Absolutvermessung durch den Roboterhersteller konnte eine deutliche Verbesserung in der Erreichung der Messposition nachgewiesen werden (ca. Faktor 2 im Mittelwert, Faktor 3 in der Standardabweichung über die Tischfläche) und die Kennwerte der Ablageergebnisse waren vergleichbar mit den bisherigen Ergebnissen. Die Verwendung eines absolutvermessenen Roboters trägt also erheblich zur erzielbaren Systemgenauigkeit bei.

Tabelle 3.2: Erzielbare Ablagegenauigkeit nach Prozess. Δ entspricht dem maximalen Unterschied der Messwerte, $\sigma_{x/y}$ steht für die Standardabweichungen in die zwei Achsrichtungen.

Absolutvermessung	Winkel	2. Aufnahme	$\Delta[mm]$	$\sigma_x[mm]$	$\sigma_y[mm]$
ja	fest	nein	$\pm 5,0$	1,7	1,0
ja	fest	ja	$\pm 0,60$	0,17	0,16
ja	variabel	ja	$\pm 0,71$	0,26	0,18
nein	variabel	ja	$\pm 1,84$	0,58	0,64

3.4.2 Stabilität des Gesamtprozesses

Nach der ersten Systemvalidierung stellt sich unmittelbar die Frage nach der Stabilität des Systems. Wiederholmessungen mit einem Zeitfenster im Rahmen von einigen Minuten hatten im vorigen Abschnitt gute Reproduzierbarkeit gezeigt. Es ist nun auch die Langzeitstabilität im Bereich von Stunden oder Tagen zu untersuchen. Unter analogen Bedingungen wurde dazu im zeitlichen Abstand von drei Tagen eine Wiederholmessung durchgeführt und zusammen mit den in Abb. 3.47 festgestellten Werten aufgetragen (Abb. 3.48). Sehr deutlich ist zu erkennen, dass der Kreisradius signifikant wächst, genauer gesagt von 0,32 mm auf 1,1 mm. Der Ablageort verschiebt sich dabei insgesamt um ca. 0,92 mm. Damit ist zu vermuten, dass keine Langzeitstabilität des Systems vorliegt. Weitere vier unmittelbar danach ausgeführte Wiederholmessungen bestätigten diese Vermutung und zeigten dabei einen deutlichen Trend zur Restabilisierung und Wiedereinstellung der ursprünglichen Werte. Eine sechste Wiederholmessung in größerem zeitlichen Abstand wies sogar einen Kreisradius von ca. 3 mm auf, der mit einer um 15°C angestiegenen Umgebungstemperatur einherging. Da ein Temperatureinfluss nun wahrscheinlich schien, wurden gezielte Untersuchungen zu möglicherweise mit thermischen Effekten verknüpften Prozessparametern unternommen.

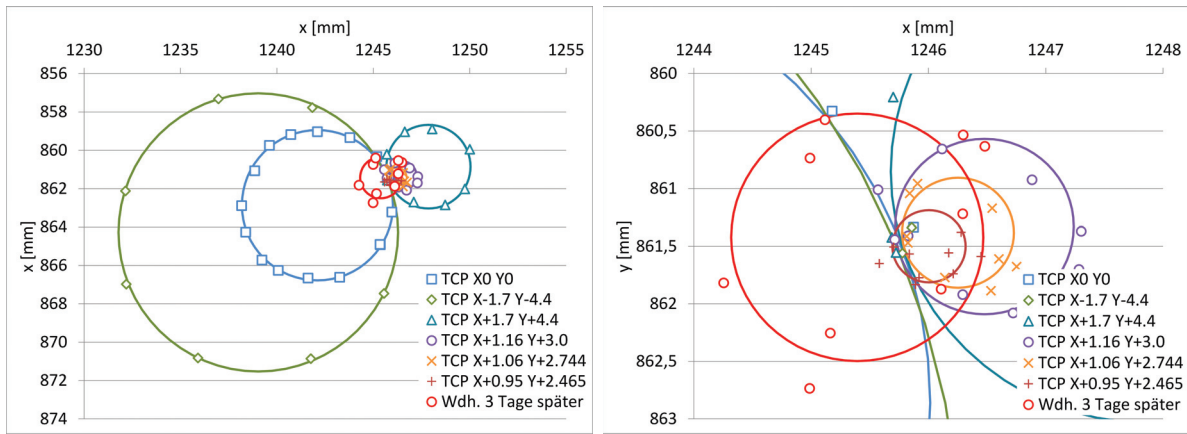


Abbildung 3.48: Wiederholmessung im Zeitabstand von drei Tagen. Rechts: Ausschnittvergrößerung

3.4.3 Thermische Drift und Zeitkonstante

Den Übergang von einem Gleichgewichtszustand in einen anderen bezeichnet man in der Physik allgemein als Relaxation [51]. Im Fall von thermischer Relaxation kann es sich z. B. um das Abkühlen eines zuvor erhitzten Körpers auf das ursprüngliche Temperaturniveau handeln. Diesen Vorgang kann man stark vereinfacht wie in Abb. 3.49 gezeigt darstellen.

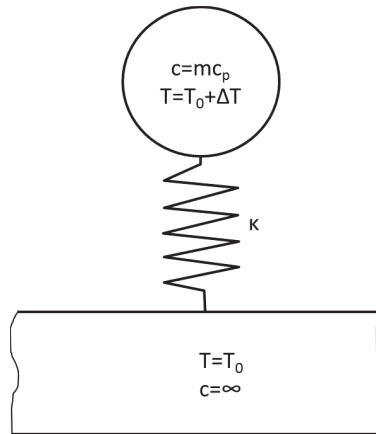


Abbildung 3.49: Schematische Darstellung zur thermischen Relaxation

In [52] ist in knapper Form die physikalische Grundlage beschrieben: eine thermische Masse mit Wärmekapazität c und Temperatur $T = T_0 + \Delta T$ ist über einen Wärmewiderstand der Wärmeleitfähigkeit κ mit einem als unendlich groß angenommenen Reservoir der Temperatur T_0 verbunden. Ist die Reservoirtemperatur konstant, so lässt sich der Vorgang mit folgender Differentialgleichung beschreiben:

$$\dot{T} = -\frac{\kappa}{c}(T - T_0) \quad (3.25)$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung ist

$$T = T_0 + \Delta T \exp\left(-\frac{\kappa}{c}t\right) \quad (3.26)$$

Um die Abklingzeitkonstante $\tau = \frac{c}{\kappa}$ zu bestimmen, trägt man $\ln(T - T_0)$ gegen die Zeit auf (analog $\ln(T_0 - T)$ bei Erwärmung). Aus der Steigung m der sich ergebenden Geraden

erhält man z.B. mit linearer Regression die gesuchte Abklingzeit gemäß $\tau = -1/m$; sie ist unabhängig von der Differenztemperatur ΔT .

Dies ist äquivalent zu einer thermischen Masse, die im thermodynamischen Gleichgewicht mit ihrer Umgebung ist und durch konstante Wärmezufuhr vom Umgebungsniveau auf eine höhere Temperatur $T_0 + \Delta T$ angehoben wird. Somit beschreibt Gleichung 3.26 den hier zu betrachtenden Vorgang des Einbringens einer Wärmelast in ein im Gleichgewicht befindliches System. Ebenso wird durch (3.26) die Antwort eines Systems auf instantane Änderungen der Basistemperatur beschrieben, was dem Verhalten bei sprunghaften Änderungen der Umgebungstemperatur entspricht. Die Relaxationszeitkonstante τ gibt Aufschluss über die Geschwindigkeit, mit der sich ein System auf thermodynamisches Gleichgewicht zubewegt. Nach Ablauf der Zeit τ ist das System noch weit vom nur asymptotisch erreichbaren Endzustand entfernt. Tabelle 3.3 gibt Aufschluss über das Verhalten: erst nach einer Zeit 3τ hat das

Tabelle 3.3: Übersicht der Zeitkonstanten

Vielfaches von τ	Wert Exponentialfunktion	Sättigung
0	1	0,0%
1	0,368	63,2%
2	0,135	86,5%
3	0,050	95,0%
4	0,018	98,2%
5	0,007	99,3%

System seinen Endzustand zu 95% erreicht. Um den Einfluss einer thermischen Größe auf den Prozess zu eliminieren muss man sich folglich überlegen, welche Temperaturänderung für den Anwendungsfall realistisch ist und nach welcher Einstellzeit ein Zustand erreicht wird, in dem der durch diese Temperaturänderung bewirkte Störeinfluss toleriert werden kann. Je nachdem kann entschieden werden, ob das System beispielsweise durch Abwarten oder Warmfahren auf Betriebstemperatur gebracht werden kann oder ob weitere Maßnahmen wie Temperierung oder externe Kompensation in Betracht gezogen werden müssen.

3.4.4 Thermische Drift des Kamerasystems

Obwohl sich das Kamerasystem im Betrieb nur auf einen Wert weit unterhalb der vom Hersteller spezifizierten oberen Temperaturgrenze erwärmt ist nach der in Abschnitt 3.3.2 festgestellten starken Winkelabhängigkeit der Messwerte das Kamerasystem ein prädestinierter Kandidat für thermisch induzierte Abweichungen. Wiederholmessungen über einige Minuten hatten sehr gute Reproduzierbarkeiten ergeben, nun ist auch das Verhalten über einen längeren Zeitraum zu charakterisieren. Abb. 3.50 zeigt den Temperaturverlauf im geschlossenen Kameragehäuse im Verlauf von drei Stunden²². Während dieser Zeit betrug die Auslösefrequenz inklusive Blitz 1 Hz. Die Wärmelasten im Kameragehäuse betragen $12\text{ V} \cdot 0,41\text{ A} = 4,9\text{ W}$ durch die Kamera, was sich leicht durch Messung des Betriebsstroms bestimmen lässt, und $0,2 \cdot 0,003 \cdot 44,8\text{ V} \cdot 16\text{ A} = 0,4\text{ W}$ durch die Beleuchtung, was einem Schätzwert aus angenommenem Wirkungsgrad von 80%, der Blitzzeit von 3ms pro Blitz und den Betriebsdaten entspricht (vgl. 3.1.3). Aus der Auftragung $\ln(T_0 - T)$ in Abb. 3.50 rechts ermittelt man die Zeitkonstante $\tau = 1/1,2926\text{ h} = 0,77\text{ h}$.

²²Die Auflösung des Thermometers (Datenlogger) beträgt nur $0,5^\circ\text{C}$, wodurch sich der treppenförmige Verlauf ergibt. Die Aussage wird hierdurch nicht eingeschränkt

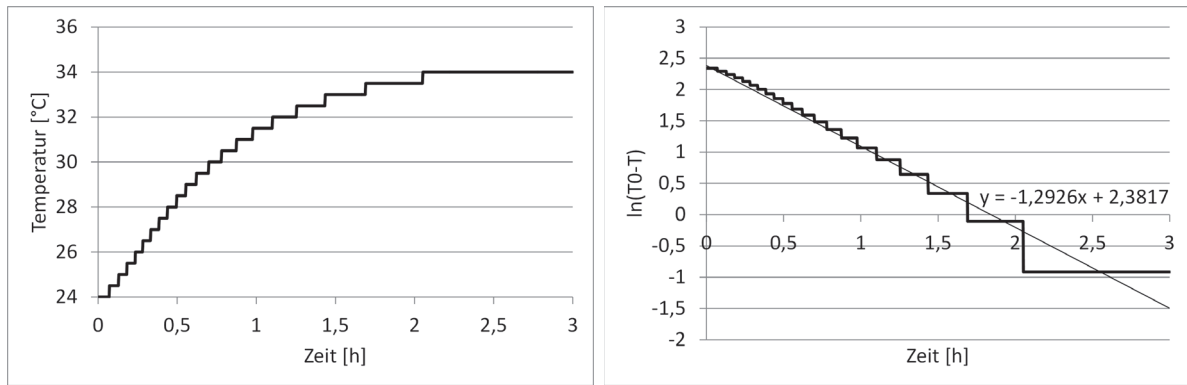


Abbildung 3.50: Temperatur im Kameragehäuse, rechts die für die Ermittlung der Relaxationszeitkonstanten benutzte Auftragung.

Betrachtet man nun im selben Zeitraum das Messsignal der Kamera anhand eines auf dem Aufnahmetisch befindlichen Referenztargets, so zeigt sich eine deutliche Drift im Bereich von 1 mm (Abb. 3.51 links). Augenfällig ist der mit Abb. 3.50 links sehr ähnliche Kurvenverlauf. Unter der Prämisse des temperaturinduzierten Verhaltens bestimmt man wie eben in Abb. 3.51 rechts als Zeitkonstante der Drift $\tau = 0,73$ h, was bis auf 5% der Zeitkonstanten des Temperaturverlaufs entspricht. Die Umgebungstemperatur wurde in diesem Zeitraum bei ausgeschaltetem Roboter im Bereich von $0,4^\circ\text{C}$ konstant gehalten. Die Kameraposition war, wie durch Messung mit dem Lasertracker nachgewiesen wurde, im Bereich von $0,05$ mm konstant. Einflüsse von außerhalb des Kamerasystems sind also auszuschließen. Wiederholmessungen nach Abkühlung der Kamera über Nacht zeigten gute Wiedereinstellung der Ursprungswerte. Die gemessene Drift ist also ausschließlich auf die Erwärmung des Kamerasystems zurückzuführen. Betrachtet man die Auflösung des Kamerasystems von $1,2$ mm pro Pixel (vgl. Tabelle 3.1) so stellt man fest, dass die Drift lediglich $0,8$ Pixel beträgt, was auf die Kamerachipgröße (vgl. S. 23) umgerechnet einem Weg von $3,8 \mu\text{m}$ entspricht und per se betrachtet sehr gering ist. Die beobachteten Effekte werden also erst durch die hohen Anforderungen an die Genauigkeit und den großen optischen Hebel relevant (vgl. Gleichung 3.23 auf S. 54).

Die Zeitkonstanten sind mit $\tau \approx 0,75$ h so hoch, dass bei einer Amplitude von 1 mm unter Zuhilfenahme von Tabelle 3.3 eine Stabilisierungszeit von etwa 3τ entsprechend 2h 15min einzuhalten ist, um eine Stabilisierung des Messwerts im Bereich von $0,05$ mm zu er-

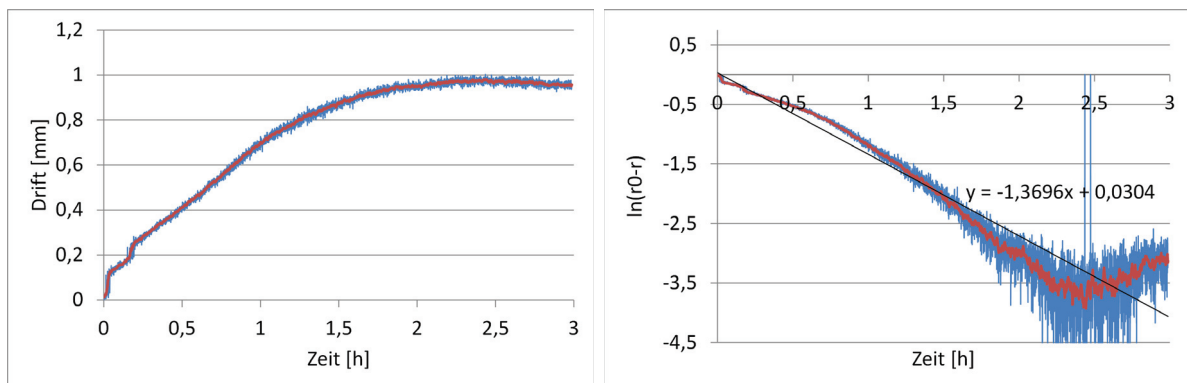


Abbildung 3.51: Drift der Messwerte des Kamerasystems, rechts die Ermittlung der Zeitkonstante. Rot eingezeichnet ist der gleitende Durchschnitt aus 20 Messungen.

reichen. Dies ist im Versuchsbetrieb zwar durchführbar, aber nicht akzeptabel, da vor jedem Versuch mehrere Stunden Anlagenzeit nicht genutzt werden können. Eine Alternative könnte der 24-Stunden-Betrieb der Kamera oder eine Temperierung des Kameragehäuses sein. Die Temperierung scheint angesichts der geringen Wärmelasten von ≈ 5 W machbar, es muss jedoch im Sinne der Dichtigkeit des Gehäuses ein Wärmetauscher sowie eine Luftumwälzung angebracht werden, was in der laufenden Versuchsreihe zeitlich nicht mehr durchführbar war. Versuche mit kühlender Blasluft aus der Druckluftleitung zeigten, dass die angestrebte thermische Stabilität nicht erreicht wird. Durch das unkontrollierte Einbringen von Luft unbekannter und variabler Temperatur verschlechtert sich das Verhalten sogar, so dass von dieser Variante abzuraten ist. Ein naheliegender Gedanke war, dass sich die relativ schwach ausgeführte Kameraaufhängung durch thermische Ausdehnung verwindet. Durch die Montage der Kamera auf einer gefrästen Platte konnte diese mögliche Ursache ausgeschlossen werden. Die Amplitude der Drift sank dabei nur geringfügig und bei ähnlicher Zeitkonstante näherte sich der Kurvenverlauf der erwarteten Exponentialfunktion weiter an - eliminiert wurde die Drift jedoch nicht. Dies deutet darauf hin, dass die Quelle der Drift wahrscheinlich die Kamera selbst und nicht die Aufhängung ist.

Aufgrund dieser Fakten wurde als alternativer Lösungsweg die Korrektur der Messwerte untersucht. Anhand der Messung mehrerer Targets konnte nachgewiesen werden, dass der Driftverlauf auf der Tischfläche in erster Näherung stetig ist. Anschließend wurde der Aufnahmetisch mit vier Referenztargets außerhalb der Nutzfläche versehen, deren Position bei der Detektion mitgemessen werden kann (Abb. 3.52 links). Mit den Positionen der Referenztargets zum Zeitpunkt der Roboterkalibrierung und den während der Detektion gemessenen Werten lässt sich eine Perspektiventransformation ermitteln, die die aktuell gemessenen Referenztargets auf ihre ursprünglichen Positionen abbildet. Aufgrund der Stetigkeit der Drift über die Tischfläche kann diese Korrektur im weiteren Verlauf auf die erhaltenen Messwerte angewendet werden. Die ursprüngliche Drift von 1 mm kann mittels dieses Verfahrens auf 0,1 mm reduziert werden. Abb. 3.52 rechts zeigt die mit diesem Verfahren erzielbare Stabilität des Systems. Eindeutig zu sehen ist, dass der Kameradrift weitere Effekte überlagert sind.

Durch diese Vorgehensweise kann zwar eine Temperierung der Kamera vermieden werden; ebenso werden Schwankungen in der Winkeltreue der Anfahrposition (vgl. 3.3.2) kompensiert. Nicht kompensiert hingegen werden Abweichungen zwischen Roboter und Roboterbase, also alles, was die Relativposition von Greifer zu Aufnahmetisch beeinflusst.

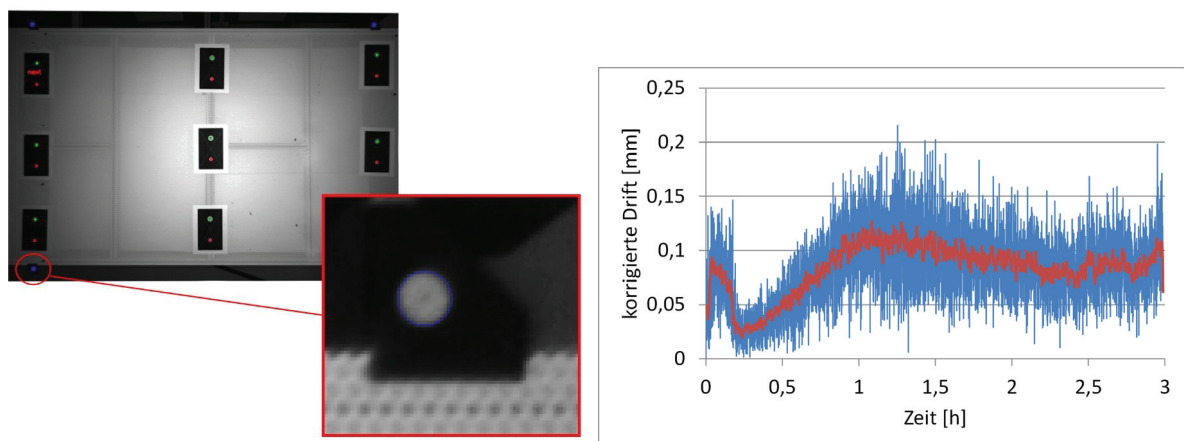


Abbildung 3.52: Korrektur der Messwert-Drift des Kamerasystems

3.4.5 Thermische Drift des Robotersystems

Der Wärmeausdehnungskoeffizient von Aluminium-Druckguss beträgt etwa $22 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ [53]. Ein drei Meter langer Roboterarm kann sich, sofern ausgestreckt, bei Erwärmung um $1,5^\circ\text{C}$ folglich bereits um 0,1 mm ausdehnen. Befindet sich der Roboter auf einer meist erheblich längeren Linearachse trägt diese ebenfalls zur Ausdehnung bei. Möchte man hierzu noch den Einfluss der Achsstellung oder den Einfluss der sich erwärmenden Getriebe betrachten, so wird die Lage schnell unübersichtlich und eine tiefer gehende Untersuchung verlässt den Rahmen dieser Arbeit. Anhand einer Messung mit dem Lasertracker und Bestimmung der Zeitkonstanten dieser thermisch induzierten Effekte kann man jedoch relativ schnell einordnen, ob der Effekt relevant ist und wie man ihm am besten begegnet. Im Folgenden werden die Einflüsse des Robotergestells sowie der Antriebe in knapper Form dargestellt und hinsichtlich ihrer Relevanz für das autonome Greifen und Ablegen bewertet.

Robotergestell

Zur Messung wurde ein Lasertracker auf dem Hallenboden in etwa 1 m Abstand zur Roboterhand aufgestellt. Ein Trackertarget wurde auf dem Roboter montiert und der ausgeschaltete Roboter bei fortlaufender Messung von Ort und Temperatur sich selbst überlassen. Nach längerer Öffnung des Hallentors bei moderat niedrigerer Außentemperatur wird dieses geschlossen, worauf die Hallentemperatur wieder ansteigt. Es ergibt sich ein Temperaturverlauf gemäß Abb. 3.53.

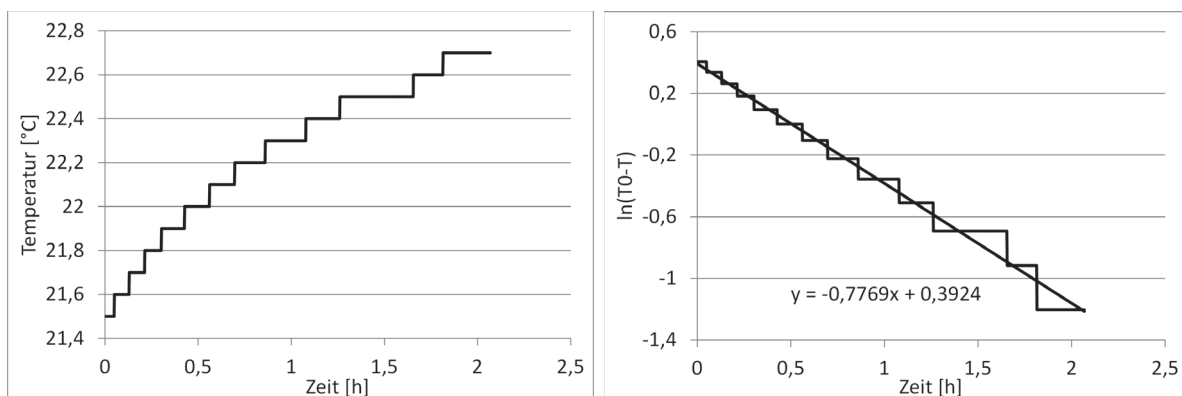


Abbildung 3.53: Drift der Hallentemperatur mit Ermittlung der Zeitkonstanten (rechts)

Die Messwerte zeigen mit guter Übereinstimmung einen exponentiellen Verlauf. Als Basistemperatur wurde 23°C angenommen und für die Auftragung in Abb. 3.53 rechts vor dem Logarithmieren abgezogen. Die Zeitkonstante τ ergibt sich mit der Geradensteigung m anschließend aus $\tau = -1/m$ zu 1,29 Stunden. Der Wert ist ungenau, da die Basistemperatur nur geschätzt werden konnte; besser wäre eine Messung über fünf Zeitkonstanten bzw. ca. sechs Stunden. Diese Messung war nicht durchführbar, da die thermische Stabilität des unklimateisierten Bereichs maßgeblich durch Öffnung des Hallentors sowie den Lichteinfall durch die Fassade bestimmt ist und eine ungestörte Messzeit von zwei Stunden bereits kaum erreichbar war. Eine genauere Messung müsste an einem betriebsfreien, bewölkten Tag ohne nennenswerte Temperaturänderung vorgenommen werden, der erzielte Genauigkeitsgewinn überwiegt hierbei jedoch nicht den Aufwand. Es kann festgehalten werden, dass die Relaxationszeitkonstante der Hallentemperatur im Bereich von eineinhalb Stunden liegt und somit eine Stabilisierung der Temperatur erst mehrere Stunden nach Beseitigung von Störeinflüssen zu erwarten ist.

Die festgestellte thermische Drift verursacht eine Temperaturänderung des Robotergeräts und somit eine Drift im Ortsraum, aufgetragen in Abb. 3.54. Auch hier zeigt sich ein zumindest näherungsweise exponentieller Verlauf. Für den Abzug in Abb. 3.54 rechts wurde als Endwert der Drift 0,09 mm angenommen, was wie eben schon bei der Endtemperatur aufgrund der relativ kurzen Messdauer ein Schätzwert ist. Die Zeitkonstante ergibt sich auf die bekannte Weise zu $\tau=1,24$ Stunden (vgl. 1,29 Stunden für die Temperatur). Die gute Übereinstimmung der Zeitkonstanten für die Drift der Umgebungstemperatur und die Drift der Roboterposition im Bereich von 4% kann als Hinweis auf einen Zusammenhang aufgefasst werden. Die festgestellte Änderung der Roboterposition von 0,09 mm relativ zu einem auf dem Hallenboden fixierten Bezugspunkt stimmt gut mit der o. g. erwarteten Wärmeausdehnung von drei Metern Aluminium-Druckguss überein, was den Zusammenhang beider Größen weiter untermauert. Im dargestellten Fall ist aufgrund der geringen Temperaturänderung die Amplitude der Störung gerade noch nicht relevant. Betrachtet man hingegen die realen anuellen und prozessinduzierten Temperaturschwankungen im nichtklimatisierten Hallenbereich des ZLP Augsburg, der auch ein Ofenbereich ist, so muss man von einer Temperaturschwankung von bis zu $\pm 10^\circ\text{C}$ ausgehen. Die Drift im Ortsraum wäre somit mit $\pm 0,6$ mm relevant, die Stabilisierungszeit auf unter 0,1 mm ist entsprechend Tabelle 3.3 mit etwa $2,5 \cdot \tau$ auf drei Stunden zu veranschlagen und kann damit nicht abgewartet werden, da die Störeinflüsse in der Regel schneller wechseln. Die beste Lösung für die hochgenaue Fertigung mit Industrierobotern ist also der in jeglicher hochgenauen Fertigung übliche und im Klimabereich der ZLP-Halle beschrittene Weg der Stabilisierung der Umgebungstemperatur.

Roboterantriebe

Nicht nur durch die Umgebung können Temperaturschwankungen eingetragen werden. Die Antriebe der Roboter selbst stellen eine Wärmequelle dar, schlimmer noch: sie erwärmen sich lastabhängig und sind direkt mit dem Robotergerüst verbunden. Erschwerend kommt hinzu, dass die Antriebe mit Getrieben ausgestattet sind, deren Spiel sich durch thermische Einflüsse verändert. Das Ausmaß der Erwärmung der Antriebe hängt vom exakten Lastfall und den gefahrenen Bewegungsprofilen ab, kann aber im Extremfall durchaus in den Bereich von 100°C kommen. Im für unsere Anwendung typischen Fall ist die Erwärmung zwar deutlich geringer, jedoch nicht notwendigerweise vernachlässigbar. Abb. 3.55 links zeigt, wie sich in diesem typischen Fall aus Einnehmen der Detektionsposition, Anfahren der Aufnahme-position (repräsentativ über den Tisch verteilt) und Wiederanfahren der Detektionsposition

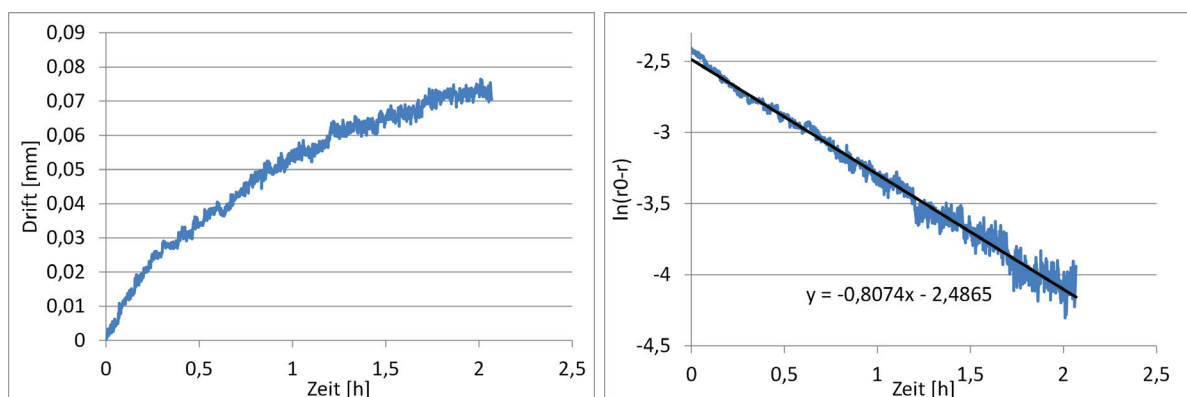


Abbildung 3.54: Drift der Position der Roboterhand mit Ermittlung der Zeitkonstanten (rechts)

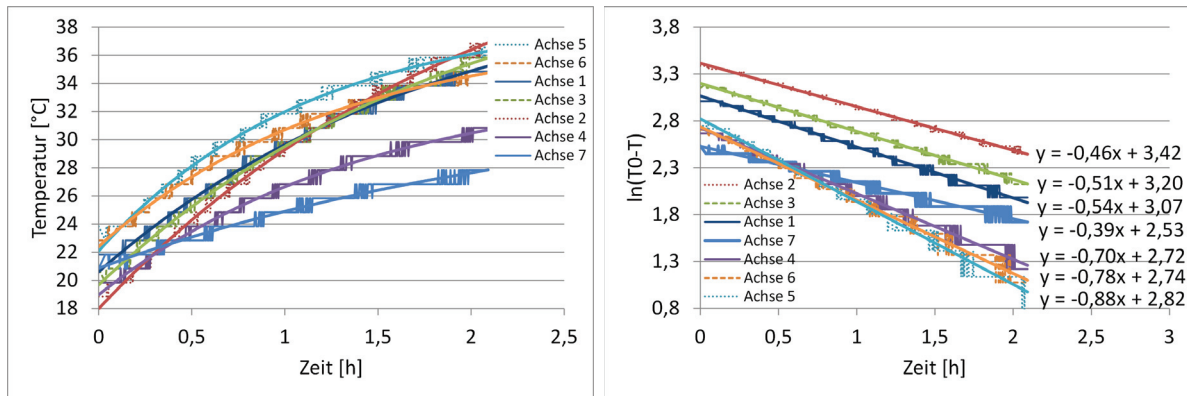


Abbildung 3.55: Drift der Antriebstemperaturen mit Ermittlung der Zeitkonstanten (rechts)

mit prozesstypischen Wartezeiten im Sekundenbereich die Temperaturen der Achsantriebe über einen Zeitraum von 1,8 Stunden entwickeln. Von der mittig über dem Tisch befindlichen Startposition wurde der Reihe nach je eine von neun auf dem Aufnahmetisch verteilten Positionen insgesamt je 92 Mal angefahren. Für unseren Zweck wurde auf die Einbringung separater Temperaturfühler verzichtet und der Wert der antriebsinternen Temperaturfühler, zu erhalten über die KUKA-Systemvariable `$MOT_TEMP[i]` mit der Achsnummer `i`, verwendet. Diese Werte sind stark quantisiert und ungenau, wir sind hier aber an der Ermittlung der Zeitkonstanten interessiert und nicht am exakten Temperaturverlauf, und für diesen Zweck genügt es, wenn die Temperatursensoren im betrachteten Bereich linear sind, was aufgrund der geringen Temperaturänderungen als gesichert anzunehmen ist. Abb. 3.55 rechts zeigt die bekannte Auftragung $\ln(T_0 - T)$ gegen die Zeit. Die Basistemperatur T_0 wurde hier mittels Least-Squares-Fit der Erwärmungskurven ermittelt, zu sehen als Linie in Abb. 3.55 links, da durch die Quantisierung der Messwerte die grafische Ermittlung der Basistemperatur nicht verlässlich durchführbar war. Tabelle 3.4 fasst die erhaltenen Ergebnisse zusammen:

Tabelle 3.4: Zeitkonstanten für die Erwärmung der Roboterantriebe

	Amplitude [°C]	Steigung	τ [h]
Achse 1	21,5	-0,5446	1,80
Achse 2	30,4	-0,4643	2,15
Achse 3	24,5	-0,5133	1,95
Achse 4	15,3	-0,7012	1,43
Achse 5	16,9	-0,8834	1,13
Achse 6	15,4	-0,7816	1,28
Achse 7	12,6	-0,3877	2,58

Es ergibt sich ein breit gefächertes Spektrum aus Erwärmungen die in unserem Lastfall mit 12,6 bis 30,4°C sehr moderat ausfallen. Die Zeitkonstanten sind erwartungsgemäß ebenfalls unterschiedlich und überdecken einen Bereich zwischen 1,1 und 2,6 Stunden.

Die Erwärmung der Roboterantriebe ist für sich gesehen nicht prozessrelevant, es kommt wie in den vorangegangenen Fällen lediglich auf die dadurch induzierte mechanische Drift an. Hierzu wurde simultan eine Messung mit dem Lasertracker durchgeführt. Die Umgebungstemperatur war dabei im Bereich von unter 0,1°C konstant. Da die ausgeführten Bewegungen aus einer Kombination der Bewegungen der sieben Achsen hervorgeht, ist keine einfache, eindeutige Rückführung auf den eben festgestellten Temperaturverlauf möglich. Es lässt sich

aber festhalten, dass nach einer Zeit von 1,8 Stunden je nach Messpunkt eine Drift zwischen 0,13 und 0,35 mm zu verzeichnen ist, die während der Messdauer keine signifikante Sättigung zeigt. Es ist also davon auszugehen, dass die Sättigungszeit höher liegt, als die Zeitkonstanten der Motoren nahelegen, was nicht überrascht, da die Antriebe wiederum in thermischer Wechselwirkung mit dem Robotergestell stehen, was die Sättigungszeit erhöht, da die Temperatur erst vom Motor ins Gestell einkoppeln muss, bevor sie dort zu einer Wärmedehnung führt. Es steht damit fest, dass die für eine thermodynamische Stabilisierung des jeweiligen Lastfalls benötigte Zeit im Bereich von mehreren Stunden liegt und folglich nicht abgewartet werden kann. Methoden zur thermischen Stabilisierung des Antriebssystems bestehen nicht. Ein schnelles „Vorwärmen“ des Roboters durch Aufwärmfahrten mit hoher Beschleunigung ist möglich [54], bedingt aber die Kenntnis der Zieltemperaturen sowie das spätere kontinuierliche Einhalten eines Verfah- und Lastprofils, was im Gegensatz zu einem Produktionsumfeld in der Entwicklung nur schwer realisierbar scheint. Die beobachteten Driften sind in einem Bereich, der durchaus relevant ist. Eine schnelle, dynamische Nachkalibrierung wie z. B. in der Fixpunkt-Methode auf S. 59 vorgeschlagen, könnte hier Abhilfe und dauerhafte Prozessstabilität schaffen, sofern man nur die hierfür geeigneten Messpunkte heranzieht. Für den Forschungsbetrieb bleibt einstweilen nur die Beschränkung der Roboterbelastung um allzu starke Erwärmungen zu vermeiden.

3.4.6 Erzielbare Prozessstabilität

Wie in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt sind die Messwerte des Bildverarbeitungssystems und die Positionen des Roboters nur dann dauerhaft stabil, wenn Randbedingungen wie Raum- und Antriebstemperatur konstant gehalten werden und die Kameradrift korrigiert wird (siehe Abschnitt 3.4.4), wobei die Kameradrift den bei weitem größten Einfluss hat. Tabelle 3.5 gibt eine Zusammenfassung über Amplitude A und Zeitkonstante τ der

Tabelle 3.5: Übersicht von Amplitude A , Zeitkonstante τ und Stabilisierungszeit t_S der untersuchten Störeinflüsse

	A [mm]	τ [h]	t_S [h]	Maßnahme
Kamerasystem $T +10^\circ\text{C}$	1-2	0,8	2,25	Korrektur, Regelung
Robotergestell $T \pm 10^\circ\text{C}$	± 1	1,2	3	Klimatisierung Halle
Roboterantriebe $T \pm 15^\circ\text{C}$	$\pm 0,5$	1,5	5	Nachkalibrierung

festgestellten Störgrößen; zusätzlich ist die Stabilisierungszeit t_S für den jeweiligen Störeinfluss angegeben, nach der die Störung einen Fehler von unter 0,1 mm verursacht. Mögliche Maßnahmen für das System Roboter bestehen in der weitest möglichen Stabilisierung der Umgebungstemperatur sowie der automatisierten Nachkalibrierung nach ein bis zwei Stunden Betrieb. Für die Einflüsse des Kamerasystems kommt eine Temperaturregelung oder eine aktive Korrektur in Frage, wobei die Korrektur gleichzeitig die als kritisch eingestufte Winkeltreue des Anfahrens der Aufnahme position kompensiert und somit präferiert wurde. Der Funktionsnachweis der Korrektur der Kameradrift über die zusätzliche Messung von am Tisch fest angebrachten Targets konnte im Rahmen dieser Arbeit erbracht werden, wobei sich durch die damit verknüpfte Kopplung an die Targets zumindest im Forschungsbetrieb nicht nur Vorteile ergeben, da bei jeder noch so kleinen Umpositionierung des Tisches das System neu eingemessen werden muss. In einem späteren Einsatz in einem Produktionsumfeld hingegen treten diese Nachteile in den Hintergrund, da die häufige betriebsbedingte

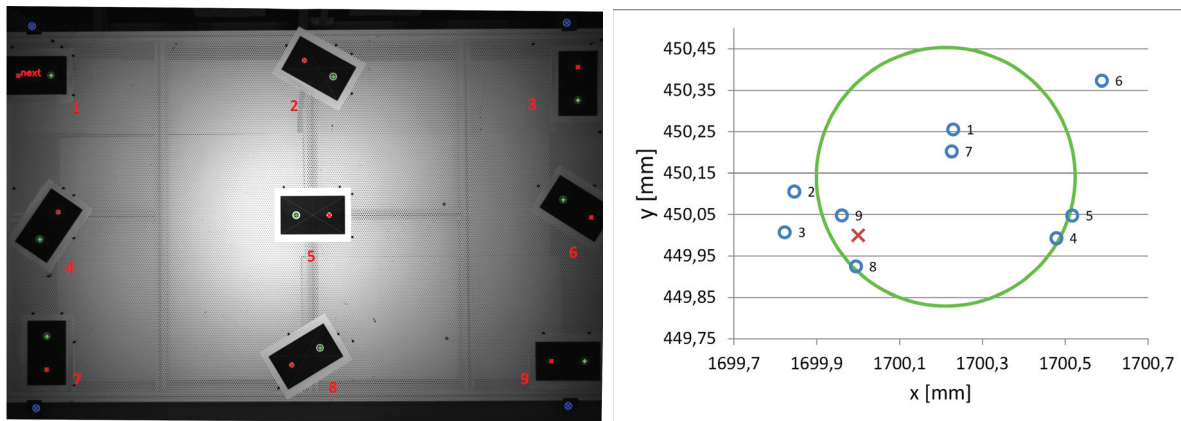


Abbildung 3.56: Wiederholversuch zur Ermittlung der Prozessstabilität der Ablage (links). Der für den Ablageort erwartete Kreis wird nicht erreicht (rechts).

Umpositionierung des Aufnahmetischs entfällt und seine Lage als fest angesehen werden kann.

Nach dem Nachweis der Funktion und der Untersuchung der unterschiedlichen Störeinflüsse stellt sich die Frage nach der Stabilität des gesamten Prozesses. Über einen Zeitraum von $2\frac{1}{4}$ Stunden wurden insgesamt 12 Ablegeversuche mit je neun in unterschiedlichen Winkeln über die gesamte Tischfläche verteilten Zuschnitten durchgeführt (Abb. 3.57 links). Die Zuschnitte wurden dabei bei jedem Ablegeversuch mittels Anschlagsschrauben reproduzierbar an derselben Stelle platziert. Es wurde festgestellt, dass der in Abschnitt 3.4.1 festgestellte kreisförmige Verlauf bei kleinen Radien vor systemimmanenten Einflüssen in den Hintergrund tritt (Abb. 3.56 rechts). Daher wurden als Kenngrößen nicht die Kreisradien, sondern die statistischen Werte für Standardabweichung σ sowie der maximalen Abweichung P-V²³ (Peak-Valley) herangezogen. Um eventuelle richtungsabhängige Trends besser erkennen zu können, wurden die Kenngrößen jeweils für beide Achsrichtungen separat ermittelt. Die Kenngrößen wurden jeweils nach Probennummer bzw. Winkel und über die Nummer des Testlaufs bzw. die Zeit gemittelt aufgetragen (Abb. 3.57, 3.58 und 3.59).

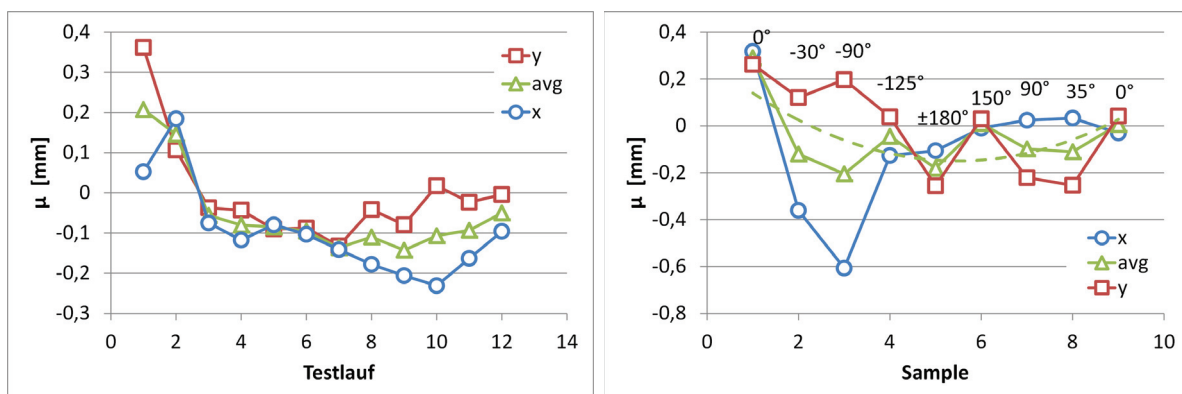


Abbildung 3.57: Stabilität des Ablageorts gemittelt nach Testlauf (links) und Probe bzw. Drehwinkel (rechts)

Abb. 3.57 zeigt die im Test erreichte absolute Ablagegenauigkeit im Mittel über die Laufnummer (links) und die Probennummer (rechts). Über die Zeit/Laufnummer ist klar eine

²³Die Differenz aus größtem und kleinstem Wert

Drift im Bereich von 0,3 mm während der ersten Stunde bzw. sechs Testläufe erkennbar; im weiteren Verlauf zeichnet sich eine gewisse Stabilisierung sowie der Beginn einer gegenläufigen Entwicklung ab. Die Hallentemperatur stieg laut Klimaaufzeichnung während der Testreihe von 21,8°C auf 23,3°C an. Gemäß Tabelle 3.5 wäre damit eine Drift von 0,15 mm über die gesamte Versuchszeit zu erwarten. Betrachtet man ferner die im Versuchszeitraum gemessene Erwärmung der Roboterantriebe von ca. 10°C, die gemäß Tabelle 3.5 mit einer fast doppelt so großen Zeitkonstanten einer Drift von etwa 0,3 mm entsprechen, so ist dies zumindest qualitativ mit dem gemessenen Verlauf in Einklang zu bringen. Da die Richtung des Einflusses der Roboterantriebe wie bereits gesagt nicht eindeutig ist, kann auch keine Aussage über Richtung und zeitlichen Verlauf der Gesamtdrift getroffen werden. Der thermische Einfluss allein würde ausreichen die Beobachtungen zu erklären, es besteht auch keinerlei Widerspruch, für eine Beweisführung genügt dies aber bei Weitem nicht. Halten wir also fest, dass eine Drift des Ablageorts im Bereich von 0,3 mm über einen Zeitraum von ca. 2 Stunden vorliegt, die wahrscheinlich thermisch bedingt ist. Diese stellt derzeit nicht das Hauptproblem für die Ablagegenauigkeit dar und kann durch automatische, stündliche Nachkalibrierung künftig eliminiert werden. Mit diesem Versuch ist auch bewiesen, dass die Kameradrift durch die in Abschnitt 3.4.4 beschriebene Korrektur sehr gut zu beherrschen ist.

In der Ablageposition zeigt sich ein im Bereich der in Abschnitt 3.3.1 festgestellten Genauigkeiten erklärbarer Einfluss der Lage der Probe auf dem Aufnahmetisch (Abb. 3.57 rechts). Der Probennummer entspricht aufgrund der Versuchsgestaltung je ein Greifwinkel, der im Diagramm als Beschriftung eingetragen wurde, es zeigt sich jedoch kein klar erkennbarer Einfluss. Ein anderes Bild zeigt sich bei Betrachtung der Standardabweichungen (Abb. 3.58).

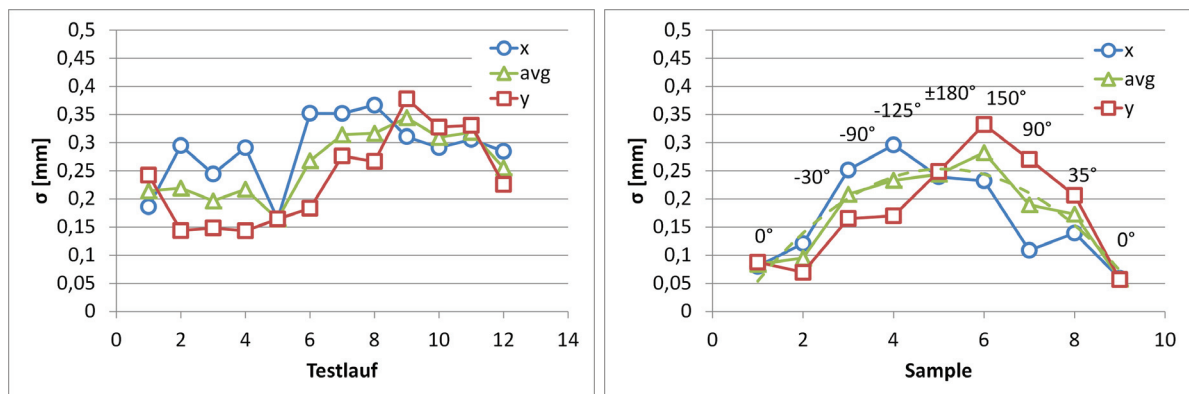


Abbildung 3.58: Verlauf der nach Testlauf (links) und Probe bzw. Drehwinkel (rechts) gemittelten Standardabweichungen

Obwohl die Streuung der Messwerte über die Zeit von im Mittel 0,2 mm auf 0,3 mm zunimmt, ist der Verlauf neben einer tendenziell in y-Richtung kleineren Standardabweichung über die Zeit nicht eindeutig oder allzu spektakulär (Abb. 3.58 links). Sehr interessant hingegen ist der vor allem in der gemittelten Kurve deutlich zu erkennende Zusammenhang zwischen Greifwinkel und Streuung der Messwerte. Demnach ist die Standardabweichung umso höher, je größer der Betrag des Greifwinkels ist, im Mittel bis zu 0,25 mm bei $\pm 180^\circ$, wohingegen sie bei 0° lediglich 0,08 bzw. 0,05 mm beträgt, was im Bereich der Wiederholgenauigkeit von Kamera und Roboter liegt. Eine Fehlkalibrierung des Greifer-TCP scheidet als Ursache aus, da sich diese auf den Ablageort auswirken würde (was nicht der Fall war) und nicht auf die Standardabweichungen. Ein Einfluss des Roboters selbst scheint aus denselben Gründen nicht wahrscheinlich, da ein nur die Streuung der Reproduzierbarkeit der

Roboterpositionierung betreffender, winkelabhängiger Effekt nicht ohne weiteres erklärbar scheint. Betrachtet man den Greif- und Ablegevorgang genauer, so stellt man fest, dass es einen winkelabhängigen, der Robotersteuerung unbekannten Einfluss gibt: die Krafteinleitung des Kabelschlepps. Wie auf Seite 59 bereits erwähnt, ist der Kabelschlepp mit einer Rückzugsvorrichtung ausgestattet. Diese besteht aus einem im hinteren, u-förmigen Teil des Schlepps montierten Glasfaserstab, der durch seine Elastizität eine Rückstellkraft erzeugt. Messungen zur Größe dieser Kraft liegen nicht vor, aus eigenen Erfahrungen kann der Autor jedoch versichern, dass sie erheblich ist. Eine Montage des Schlepps am Greifer zum Zwecke der Zugentlastung der Kabel ist nur in bestimmten Roboterstellungen möglich, da sonst die benötigte Auszugskraft schlicht nicht manuell aufzubringen ist. Wie in Abschnitt 3.3.1 bereits erwähnt, berücksichtigt die Robotersteuerung zwar Massen und Trägheitsmomente von Roboter und Zusatzlasten, kann aber natürlich keine zusätzlich aufgebrachten, unbekannten Kräfte berücksichtigen. Zusammen mit dem bereits beschriebenen widerspenstigen Verhalten des Schlepps beim Überqueren des Roboterhandgelenks (Achse 5) ist der wahrscheinlichste Grund für die Winkelabhängigkeit der Einfluss des Kabelschlepps. Der Kabelschlepp ist zum Betrieb von Greifer und Kamera notwendig. Leicht umsetzbare Möglichkeiten zu einer alternativen Kabelführung existieren in unserer Konfiguration nicht. Ein Vergleichsversuch mit verbesserter Kabelführung erwies sich im Rahmen dieser Arbeit daher als nicht mehr durchführbar. Der Einfluss extern eingebrachter Kräfte auf die Positioniergenauigkeit ist Gegenstand aktueller Forschung am ZLP [55]; die Ergebnisse bleiben abzuwarten.

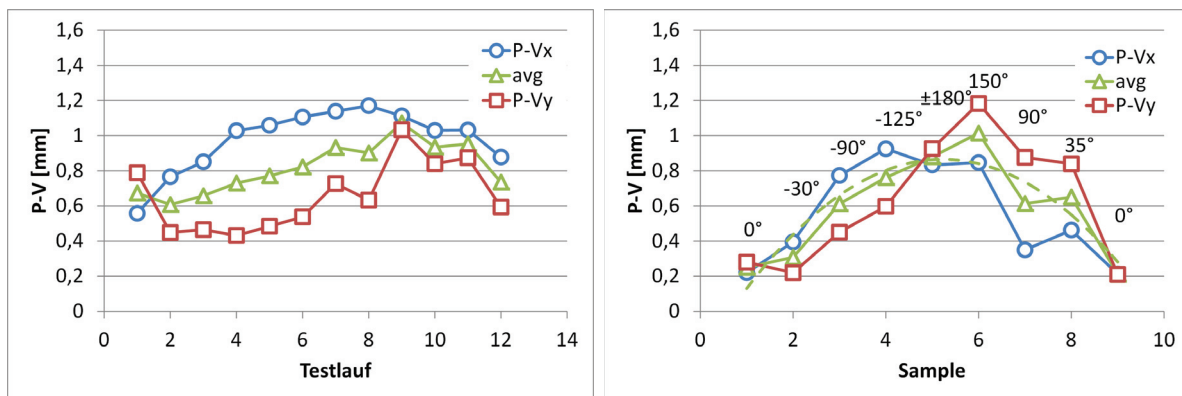


Abbildung 3.59: Verlauf der nach Testlauf (links) und Probe bzw. Drehwinkel (rechts) gemittelten Maximalabweichungen

Ein ähnliches Bild wie bei den Standardabweichungen zeigt sich bei der Betrachtung der Maximalabweichungen in Abb. 3.59. Die Peak-Valley-Werte steigen über die Zeit von 0,7 mm auf bis zu 1 mm an und scheinen sich dann wieder zu verbessern, was, ebenso wie bei der Absolutposition, auf thermische Effekte zurückzuführen sein dürfte, deren Überlagerung im Endergebnis nicht mehr klar zuordenbar ist. Diese Werte entsprechen einer Ablagegenauigkeit im Bereich von $\pm 0,5$ mm, vergleichbar mit den in 3.1.1 geforderten Werten. Interessant, wenn auch bei Kenntnis der Standardabweichungen nicht überraschend, ist auch hier, dass die größten Abweichungen bei betragsmäßig großen Drehwinkeln anzutreffen sind. Möchte man also beispielsweise mit einer Maximalabweichung unterhalb $\pm 0,2$ mm Plybooks mit stumpfen Stößen sicher beherrschen, so sollte man den Prozessablauf so gestalten, dass sich keine Verdrehungen über 30° ergeben²⁴; alternativ sollte unbedingt die Krafteinleitung durch den

²⁴Ob und wie dies im exakten Anwendungsfall möglich ist, sollte bei Kenntnis desselben genauer geprüft werden.

Kabelschlepp untersucht und minimiert werden, was im Rahmen dieser Arbeit leider nicht mehr erfolgen kann. Erst an zweiter Stelle kann die dynamische Nachkalibrierung des Systems hier für Verbesserungen sorgen: sie beeinflusst zwar die festgestellten zeitlichen Trends, nicht aber die derzeit dominanten, winkelabhängigen Effekte.

Fazit

Neben den noch zu klärenden pathologischen Fällen im Folgeabschnitt hat das System seine prinzipielle Eignung für den Einsatz in der Bauteilerstellung gezeigt und sollte nun anhand von Use-Cases validiert werden. Die ursprünglich geforderten Systemgenauigkeiten werden erreicht und können übertroffen werden, wenn die bereits jetzt erkennbaren Optimierungspotenziale ausgeschöpft werden. Speziell zum Thema stumpfer Stoß lässt sich sagen, dass hier konzeptionelle Arbeit nötig ist: bei Ablage auf einen Soll-Ort werden sich stets Toleranzen in beide Richtungen ergeben, d. h. bereits die Zuschnitte sollten etwas kleiner als für den stumpfen Stoß nötig und mit Minustoleranz ausgelegt werden. Das benötigte Untermaß kann mit den obigen Ergebnissen derzeit auf allseitig $\approx -0,85$ mm ($\approx -0,5$ mm aufgrund der Ablagegenauigkeit und $\approx -0,35$ mm aufgrund der Streuung) festgelegt werden, durch Umsetzung der o. g. Optimierungen ist eine Reduzierung auf weniger als die Hälfte denkbar. Eine sensorgestützte Nachführung, angelehnt an die manuelle Produktion, scheint dem Autor abgesehen von Spezialfällen wenig sinnvoll. Mit einem solchen Ansatz wird letztlich die Kompensation menschlicher Ungenauigkeit nachgeahmt, ohne die nachweislich vorhandenen Stärken des Automatisierungssystems Roboter zu nutzen.

3.5 Produktion aus dem Plybook

In der CATIA Workbench „Composites Part Design“ (CPD) können beliebige Flächen mit Faserverbundmaterial belegt werden. Der Konstrukteur erstellt die Ablagefläche und legt Faserichtung, Zuschnittsgeometrien, Lagenaufbau und -material fest. Schließlich wird mittels sog. Drapiersimulation der Zusammenhang zwischen den auf der Ablagefläche befindlichen Zuschnitten und den aus dem als Halbzeug vorliegenden Material zu erstellenden Zuschnitten hergestellt. Einfach ausgedrückt wird mittels Drapiersimulation bereits bei der Konstruktion ermittelt, wie ein ebener 2D-Zuschnitt gegebenen Materials auszusehen hat, damit er nach dem Ablegen und Drapieren in die gewünschte 3D-Form passt und möglichst überall die gewünschte Faserorientierung aufweist. Nach diesem „Flattening“ genannten Prozess kann eine XML-Beschreibung des Lagenaufbaus und aller Zuschnittsgeometrien als sogenanntes Plybook exportiert werden. Drapieralgorithmen sind trotz der weiten Verbreitung von CATIA CPD und dem enthaltenen Solver weiterhin Gegenstand aktueller Forschung, da der Drapieralgorithmus maßgeblichen Einfluss auf praktisch alle Prozessparameter hat. Für CPD sind derzeit die kommerziellen Erweiterungen „Advanced Fiber Modeler“ zur erweiterten Drapiersimulation und „Composite Link“ für den Export weiterer Parameter verfügbar. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ausschließlich der stets verfügbare Standard-Solver aus CATIA V5 R19 verwendet und getestet, wodurch sich aufgrund der abwickelbaren Geometrien aber kein nennenswerter Nachteil hinsichtlich der Drapiersimulationsergebnisse ergeben sollte.

3.5.1 Inhalt des Plybooks

Nach dem Export des Plybooks erhält man eine XML-Textdatei wie in Listing 1 im Anhang gezeigt. XML-Dokumente haben eine Baumstruktur; die Elemente sind mit Start- und Endtags geklammert (`<Tag-Name> ... </Tag-Name>`) oder sind sog. Empty-Element-Tags (`<Tag-Name />`). CPD bietet die Möglichkeit Elemente zu strukturieren, wobei die Strukturierung zumindest teilweise optional ist. Die Konturen können einem Stacking (Zeile 1/22) zugeordnet sein, unter dem Stacking kann es eine Plygroup geben (Zeile 2/20), unter der Plygroup eine Sequence (Zeile 3/19). Oberstes für uns relevantes Element der Datenstruktur ist die Ply (Zeile 4/18). Sie enthält zumindest eine 3D-Kontur (Zeile 6-12) die aus einer äußeren Kontur (Zeile 7-11) und optional inneren Konturen für Ausschnitte im Material besteht. Diese kommen in den betrachteten Use-Cases jedoch nicht vor und wurden daher im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt. Entweder enthält die Ply, wie hier gezeigt, nun direkt eine 2D-Kontur (Zeile 13-17) oder sie ist in Cutpieces untergliedert (Listing 2 im Anhang). Die Abhandlung von inneren Konturen in der 2D-Kontur ist dabei noch nicht vollständig geklärt, da es keinen separaten Tag gibt, der die Kontur als äußere oder innere Kontur identifiziert. Nach der 3D-Kontur der Ply wird eine Cutpiece-Group definiert (Zeile 15/49 in Listing 2), welche die Cutpieces enthält (Zeile 16-32 und Zeile 33-48). Jedes Cutpiece hat wiederum eine 3D- und eine 2D-Kontur (Zeile 17-23 und 25-31 für das erste Cutpiece) analog zur Ply ohne Cutpieces. Die 3D-Kontur der Ply ist dabei die Umrandende der 3D-Konturen der Cutpieces. Wichtig zu bemerken ist, dass das Plybook lediglich die Konturen der Zuschnittsränder enthält. Der Standard-Exporter liefert keinerlei Information über den Zusammenhang der 2D- und 3D-Flächen (Abb. 3.60). Für die Weiterverarbeitung der Daten hat es sich bewährt, das Plybook mittels eines Präprozessors vorzuverarbeiten und die Zuschnittskonturen in einer ASCII-Datei abzuspeichern. Im selben Arbeitsschritt können Metainformationen für den folgenden Abschnitt, insbesondere das *MinAreaRect* [65], gewonnen werden.

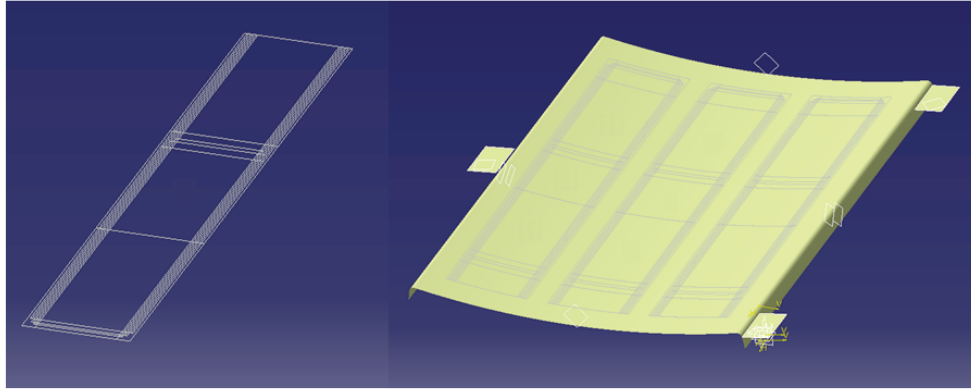


Abbildung 3.60: Veranschaulichung des geometrischen Inhalts eines Plybooks (aus [64]): Für jeden Zuschnitt sind die Konturen in 2D (links) und 3D (rechts) enthalten. Es gibt keine weiterführende Information über den Verlauf innerhalb der Zuschnittsflächen.

3.5.2 Was im Plybook fehlt

Beim autonomen Greifen stellt sich zunächst die Frage, wo und auch wie der ebene Zuschnitt zu greifen ist. Nennen wir diesen Punkt der Einfachheit halber *Grippoint*. Dieser Punkt ist nicht einfach ein Punkt \vec{p} aus dem \mathbb{R}^3 , sondern ein **frame** (vgl. 3.1.6), der neben den kartesischen Koordinaten x, y und z auch ein lokales Dreibein, definiert über die drei Eulerwinkel A, B und C enthält. Dieses Dreibein gibt Aufschluss über eine eventuelle Drehung des Greifers um die z -Achse; eine Drehung um die beiden anderen Achsen ist ausgeschlossen, da der Zuschnitt in der x - y -Ebene liegt, d. h. $B = 0, C = 0$ und o. B. d. A. $z = 0$ (Abb. 3.61).

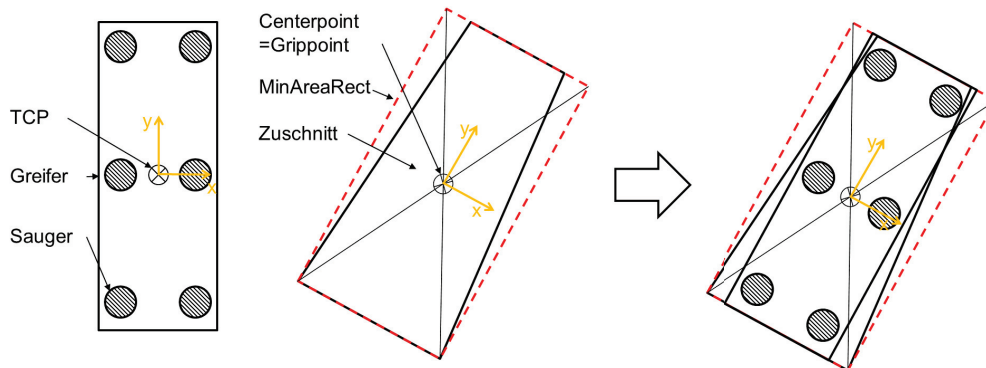


Abbildung 3.61: Zum Bezugspunkt des Grippoints

Da der Robotersteuerung nur das Tischkoordinatensystem und der TCP des Greifers bekannt sind, stellt sich bei einem beliebig orientierten Zuschnitt die Frage nach einem Bezugspunkt des Grippoints relativ zum Zuschnitt. Das Plybook enthält keine Information über diesen **frame**, man muss ihn selbst definieren. Als geeigneter Bezugspunkt kann der Flächenschwerpunkt des rotierten Rechtecks mit minimaler Fläche (MinAreaRect) um die 2D-Zuschnittskontur verwendet werden, da dieser Punkt unabhängig vom Koordinatensystem ist und für jeden Zuschnitt existiert (*Centerpoint*). Im Allgemeinen sollte hier das Koordinatensystem der 2D-Zuschnitte verwendet werden, auf das sich der Centerpoint bezieht. Nehmen wir in unserem Beispiel an, die x -Achse zeige entlang der kürzeren Seite, die y -Achse entlang der längeren Seite und die z -Achse aus der Zuschnittsebene nach oben. Dann kann der Zuschnitt korrekt gegriffen werden, wenn der Greifer mit seinem TCP in

den Centerpoint fährt und den entsprechenden Greifwinkel A ($\hat{=}$ Drehung um die z-Achse) einnimmt. Der Grippoint im Tischkoordinatensystem inklusive Greifwinkel ϕ wird dann final über das Bildverarbeitungssystem bestimmt. Es kann Fälle geben, in denen der Centerpoint außerhalb der Zuschnittsfläche liegt, z. B. wenn der Zuschnitt eine zusätzliche innere Kontur aufweist (hier: ovaler Ausschnitt) aufweist (Abb. 3.62).

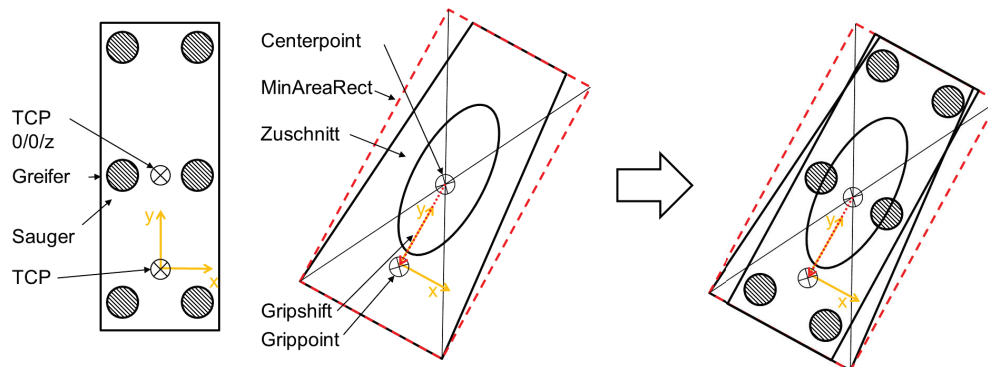


Abbildung 3.62: Vorgehen bei Centerpoint außerhalb der Zuschnittsfläche

Im Allgemeinen existiert kein 2D-3D-Bezug zwischen Punkten außerhalb der Zuschnittsfläche, dieser wird aber später benötigt (vgl. 3.5.3). Man muss sich in solchen Fällen mit der Einführung einer *Gripschift* behelfen, in Abb. 3.62 als gestrichelter Vektor eingezeichnet. Der Grippoint wird nicht auf den Centerpoint, der in diesem Beispiel nicht Teil des Zuschnitts ist, sondern auf einen geeigneten Punkt innerhalb der Zuschnittsfläche gelegt. Die Gripschift liegt in der x-y-Ebene und ist nichts weiteres als die Differenz zwischen diesen beiden Punkten.

Wie wir gesehen haben, fehlen zur Verarbeitung der im Plybook definierten Zuschnitte also die **frames** *Centerpoint*, *Grippoint*, *TCP* und ggf. *Gripschift*. Die Bestimmung des Centerpoints kann automatisch geschehen, der Grippoint ist dann entweder identisch mit dem Centerpoint oder wird anhand der 2D-Zuschnittsdaten geeignet verschoben und übernimmt die Orientierung des 2D-Zuschnitts-Koordinatensystems aus dem CAD. Der TCP des Greifers ist anschließend so zu wählen, dass der Greifer möglichst optimal aufsetzt. Dies kann beispielsweise grafisch anhand der Zuschnittsgeometrien im CAD geschehen. Ziel dabei ist es, die Zuschnitte mit einem gegebenen Greifer möglichst optimal zu greifen; an der Automatisierung dieses Vorgangs wird derzeit in weiteren Projekten am ZLP geforscht. Der TCP bezieht sich wie üblich auf den Roboterflansch [33], d. h. um den TCP zu erhalten muss man die Greifflächen auf die Zuschnittsebene ausrichten und dann den Grippoint im Flanschkoordinatensystem ausdrücken. Da der Grippoint eigentlich ein **frame** ist, sind die korrekten Eulerwinkel mit zu bestimmen, was z. B. in CATIA nicht ohne zusätzliche externe Umrechnung möglich ist. Im Rahmen dieser Arbeit wurden nur Greifer betrachtet, die nicht abgewinkelt sind und damit eine zur Flanschachse z normale Wirkflächenebene haben, was die TCP-Bestimmung auf ein zweidimensionales Problem reduziert. In Use-Case 1 wurde nur die Gripschift verwendet, alle Zuschnitte wurden bei statischem TCP auf denselben Punkt abgelegt, in Use-Case 2 war der Grippoint stets identisch mit dem Centerpoint und damit der TCP ebenfalls statisch. Use-Case 3 hat den höchsten betrachteten Komplexitätsgrad: hier ist beim Greifen und bei der Ablage ein dynamischer TCP notwendig.

Der Greifer setzt mit seinem TCP auf dem Grippoint verdreht um den Greifwinkel ϕ auf und greift den Zuschnitt. Spätestens wenn der Zuschnitt am Greifer hängt, stellt sich die Frage, wie der TCP des Greifers zur korrekten Ablage positioniert werden muss. Auch dieser **frame** ist nicht Teil des Plybooks und muss bestimmt werden, um den Zuschnitt nach dem Greifen korrekt abzulegen.

3.5.3 Flattening und Geometry Transfer - von 3D nach 2D und zurück

Für die vorliegende Arbeit ist von besonderem Interesse, dass bei der Durchführung der Drapiersimulation - unter der Annahme der Korrektheit des Ergebnisses - festgelegt wird, wie ein zweidimensionaler Zuschnitt eines gegebenen Materials zu dimensionieren ist, um nach dem Ablegen und Drapieren die gewünschte 3D-Form²⁵ einzunehmen.

Allgemein gesagt ergibt sich bei diesem Vorgang eine bijektive, stetige, im allgemeinen nichtlineare Abbildung F zwischen zwei Flächen \bar{A}_{3D} und \bar{A}_{2D} . Diese ist lediglich CPD-intern bekannt, es werden keine Informationen darüber in das Plybook exportiert; im Plybook finden sich diesbezüglich nur die Zuschnittskonturen in 2D und 3D (Abb. 3.60). Es gilt

$$\vec{r}' \xrightleftharpoons[F^t]{F} \vec{r}, \quad \vec{r}' \in \bar{A}_{3D}, \quad \vec{r} \in \bar{A}_{2D} \quad (3.27)$$

Ein gegebenes lokales, orthogonales Koordinatensystem mit in der 2D-Zuschnittsebene liegender x- und y-Achse wird durch diese Abbildung in ein krummlinig-orthogonales Koordinatensystem (siehe z. B. [66]) mit in der 3D-Zuschnittsfläche liegender x'- und y'-Achse abgebildet. Die z- bzw. z'-Achse ist dabei zur Fläche jeweils orthogonal (Abb. 3.63).

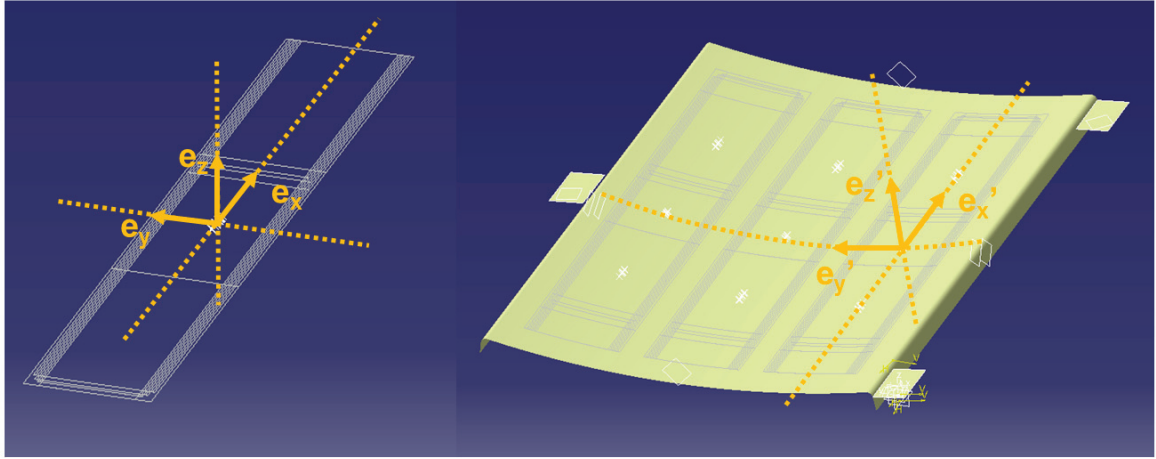


Abbildung 3.63: Der auf dem ebenen Zuschnitt liegende Greifpunkt wird zusammen mit dem lokalen Dreibein in die 3D-Form transformiert [64].

Legt man Greifpunkt und Greiferorientierung in 2D fest, muss man lediglich die beim Flattening verwendete Abbildung F in F^t umkehren, um Ablagepunkt und Orientierung in 3D zu erhalten. Hierfür gibt es zwei Wege:

1. Verwendung der beim Flattening verwendeten Software
2. Numerische Näherung bei Kenntnis hinreichend vieler Stützpunkte auf beiden Flächen

Weg 2 scheint dabei langfristig höheres Automatisierungspotenzial zu bieten, es sei denn, man hat direkten Zugriff auf die Drapiersimulations-Software; Weg 1 hingegen ist schneller

²⁵Nehmen wir der Kürze halber an ein hinreichend genaues 3D-Modell der realen Ablagegeometrie inklusive Referenzpunkten zum Koordinatenabgleich liege bereits vor und der Skin Swap von der Ideal- auf die Realgeometrie sei in befriedigender Weise vollzogen.

umsetzbar und wurde hier für die ersten Evaluierungen bevorzugt. Ein lokales Dreibein in krummlinigen Koordinaten im Punkt \vec{r}' ergibt sich durch Ableitung nach den Koordinatenrichtungen in diesem Punkt:

$$\vec{e}_{x'} = \frac{\partial \vec{r}' / \partial x'}{|\partial \vec{r}' / \partial x'|}, \quad \vec{e}_{y'} = \frac{\partial \vec{r}' / \partial y'}{|\partial \vec{r}' / \partial y'|}, \quad \vec{e}_{z'} = \frac{\partial \vec{r}' / \partial z'}{|\partial \vec{r}' / \partial z'|} \quad (3.28)$$

Dies lässt sich numerisch nachbilden, indem nicht nur der Punkt \vec{r} transformiert wird, sondern auch zwei weitere auf der positiven x- und y-Achse liegende Punkte \vec{x}_0 und \vec{y}_0 , die nahe genug bei \vec{r} liegen, um das lokale Dreibein gut anzunähern, aber nicht so nahe, dass numerische Ungenauigkeiten sich störend auswirken. Dafür wird der Parameter $\lambda > 0$ geeignet gewählt:

$$\vec{x}_0 = \vec{r} + \lambda \vec{e}_x, \quad \vec{y}_0 = \vec{r} + \lambda \vec{e}_y \quad (3.29)$$

Die drei 2D-Punkte werden CATIA CPD zum *Geometry Transfer* überantwortet, wodurch sich drei 3D-Punkte ergeben, die für den Ablageprozess verwendet werden können. Auch diese Punkte werden in einer ASCII-Datei gespeichert, so dass das Ablegeprogramm sie später verwenden kann. Es gilt dann für die Einheitsvektoren in 2D

$$\vec{e}_x = \frac{\vec{x}_0 - \vec{r}}{|\vec{x}_0 - \vec{r}|}, \quad \vec{e}_y = \frac{\vec{y}_0 - \vec{r}}{|\vec{y}_0 - \vec{r}|}, \quad \vec{e}_z = \vec{e}_x \times \vec{e}_y \quad (3.30)$$

und entsprechend in 3D

$$\vec{e}_{x'} = \frac{\vec{x}'_0 - \vec{r}'}{|\vec{x}'_0 - \vec{r}'|}, \quad \vec{e}_{y'} = \frac{\vec{y}'_0 - \vec{r}'}{|\vec{y}'_0 - \vec{r}'|}, \quad \vec{e}_{z'} = \vec{e}_{x'} \times \vec{e}_{y'} \quad (3.31)$$

Das Kreuzprodukt für die Bildung von \vec{e}_z bzw. $\vec{e}_{z'}$ wird verwendet, da CPD nur Punkte in der Zuschnittsebene zurück in 3D transformieren kann. Es bleiben noch die für den Roboter benötigten Euler-Winkel aus den Komponenten der Einheitsvektoren zu bestimmen. Mit

$$\vec{e}_{x'} = \begin{pmatrix} x'_1 \\ x'_2 \\ x'_3 \end{pmatrix}, \quad \vec{e}_{y'} = \begin{pmatrix} y'_1 \\ y'_2 \\ y'_3 \end{pmatrix}, \quad \vec{e}_{z'} = \begin{pmatrix} z'_1 \\ z'_2 \\ z'_3 \end{pmatrix} \quad (3.32)$$

ergeben sich die Eulerwinkel in KUKA-Konvention (z-y-x) zu

$$A' = \arctan \frac{x'_2}{x'_1}, \quad B' = \arcsin(-x'_3), \quad C' = \arctan \frac{y'_3}{z'_3} \quad (3.33)$$

Somit liegen mit \vec{r}' , A' , B' und C' alle Komponenten des für die Ablage benötigten **frames** vor, nennen wir ihn der Einfachheit halber *Droppoint*. Abbildung 3.64 veranschaulicht am konkreten Fall der Stringerbase aus Use-Case 2 die Lage von Grippoint und Droppoint sowie die verwendeten Koordinatensysteme. Das mit x_T und y_T bezeichnete Koordinatensystem bezieht sich auf den Tisch. Alle Roboterbewegungen zum Greifen erfolgen in diesem Koordinatensystem und es existiert eine Transformation in beide Richtungen zwischen Tisch- und Kamerakoordinatensystem. Die im Bild rechts befindliche Form verfügt über ihr eigenes, hier um 90° verdrehtes Koordinatensystem, das mit dem Koordinatensystem im CAD übereinstimmt und mit x' und y' bezeichnet ist. Dies ist das Koordinatensystem der oben eingeführten Fläche \bar{A}_{3D} . Es ist notwendig, da sich alle Operationen in CATIA CPD auf ein festes Koordinatensystem beziehen und die Verschiebung der Form auf dem Aufnahmetisch

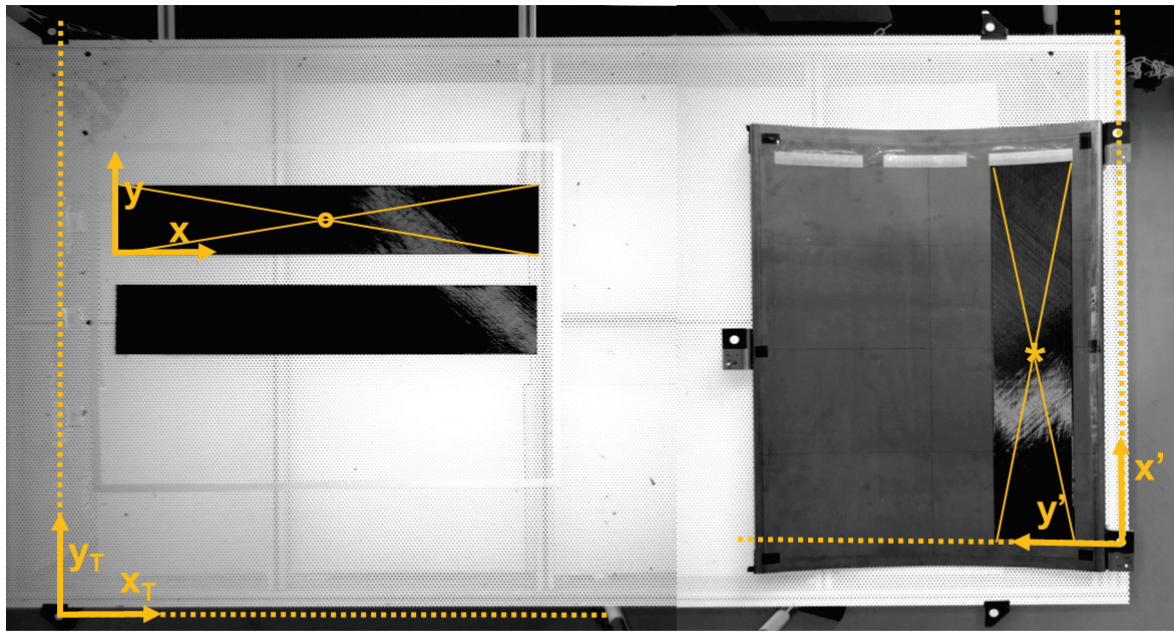


Abbildung 3.64: Lage von Grippoint (o), Droppoint (*) und Koordinatensystemen am Beispiel von Use-Case 2

sonst eine Verschiebung der Form im CAD-Modell mit anschließender Neuberechnung aller Punkte nach sich ziehen würde. Des Weiteren trägt dieses Vorgehen zur Minimierung der absoluten Roboterabweichungen bei, da der Weg vom Koordinatenursprung zum Ablageort kurz bleibt. Es gibt aber noch das dritte Koordinatensystem bezeichnet mit x und y , das Koordinatensystem der eingangs erwähnten 2D-Fläche A_{2D} . Die genaue Lage dieses Koordinatensystems ist von der Ausführung des Flattenings und der Auswahl der Flattening-Ebene abhängig, es ist hier einfach an einer Ecke des Zuschnitts mehr oder weniger willkürlich eingezeichnet und soll damit verdeutlichen, dass die Zuschnittskordinaten und damit auch Centerpoint und Grippoint (und ggf. Gripshift) sich auf dieses Koordinatensystem beziehen. Die Bezugspunkte der einzelnen **frames** sind in Tabelle 3.6 zusammenfasst.

Tabelle 3.6: Übersicht der zusätzlich zu bestimmenden Koordinaten und Dreibeine, in Klammern jeweils die im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachteten Fälle.

Bezeichnung	Beschreibung	Elemente	Bezug
Centerpoint	Mittelpunkt MinAreaRect	x, y	Zuschnitt
Grippoint	Aufsetzpunkt beim Greifen	x, y, A	Zuschnitt
Gripshift	Verschiebung Grippoint-Centerpoint	$x, y, (A)$	Zuschnitt
TCP	Tool-Centerpoint Greifer	$x, y, (z), A, (B,C)$	Flansch
Droppoint	Ablagepunkt	x, y, z, A, B, C	Form

Diese Vorgehensweise kann auch in Anwendungsfällen ohne Zuschnittserkennung benutzt werden. Vom Autor selbst konnte bei der Herstellung eines Demonstratorbauteils mit zwei kooperierenden Robotern gezeigt werden, dass ohne Teachen der Roboter Zuschnitte zu selbst großen Bauteilen (hier: Rumpfschalensegment mit ≈ 4 m Durchmesser) verarbeitet werden können [67]. Bedingung ist dabei, dass die Zuschnitte auf feste Anschläge am Auf-

nahmetisch ausgerichtet werden, da die Roboter blind greifen. Wichtig zu bemerken ist, dass diese Methode nur Aufschluss über das Verhalten direkt über dem Tisch sowie direkt über der Form gibt. Der Weg vom Tisch in die Form kann voll von Störkanten und Hindernissen sein und muss separat betrachtet werden. In den Use-Cases und bei dem eben genannten Testbauteil wurde aufgezeigt, wie von jeweils stabilen Transferpositionen aus gegriffen und abgelegt werden kann, wobei zwischen diesen beiden Positionen der stets gleiche Weg auf herkömmliche Weise geteacht wird. Alternativ können auch automatische Verfahren zur Kollisionserkennung und -vermeidung zum Einsatz kommen [34], wodurch zusammen mit Zuschnittserkennung und digitalem Workflow ein zu 100% autonomes System entsteht.

3.5.4 Produktionsplanung: Festlegung der Reihenfolge

Da das Plybook keine eindeutige Reihenfolge für z. B. Cutpieces oder Plies innerhalb einer Sequence liefert, stellt sich die Frage wie diese festzulegen ist bzw. in welchem Zustand welche Arbeitsschritte als nächstes sinnvoll und möglich sind. In unserem ersten Use-Case (Abschnitt 4.2) ist der Ablauf linear, d. h. die Plies 1-9 müssen der Reihe nach aufeinander gestapelt werden; Varianten sind nicht möglich. In Use-Case 2 (Abschnitt 4.3) hingegen werden zweimal drei lange und einmal sechs kurze Stringerbases in eine Form gelegt und es ist möglich, das korrekte Layup mit verschiedenen Legereihenfolgen zu erreichen.

Bei genauerer Überlegung fällt die Ähnlichkeit zur Beschreibung von zeitlichen Abläufen mit Abhängigkeiten im Projektmanagement auf. Serielle und parallele Vorgänge münden in Meilensteine, Darstellungsform ist meist das Gantt-Diagramm [68]. Mögliche Vorgänge haben einen erreichten Meilenstein oder abgeschlossenen Vorgang als Vorgänger.

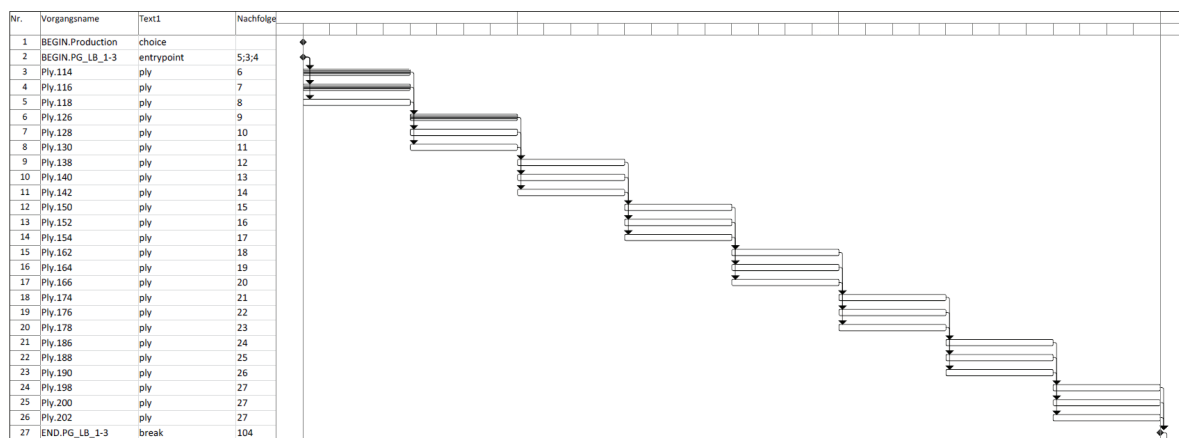


Abbildung 3.65: Aufschluss über mögliche Reihenfolgen liefert das Gantt-Diagramm.

Beim in Abb. 3.65 gezeigten Zustand liegen die ersten beiden Zuschnitte von Stringerbase 1 (Ply 114 und 126) und der erste Zuschnitt von Stringerbase 2 (Ply 116), dargestellt durch abgeschlossene Vorgänge. Als nächstes kann nun die erste Lage von Stringerbase 3 (Ply 118), die zweite Lage von Stringerbase 2 (Ply 128) oder die dritte Lage von Stringerbase 3 (Ply 138) gelegt werden. Es kann aufgrund der Laufzeit des Algorithmus (vgl. S. 30) sinnvoll sein, nicht zu viele Varianten zuzulassen, da ja alle möglichen Fälle auch durchzurechnen sind. Ebenso ist es denkbar, dass logistische Erwägungen von vornherein

eine bestimmte Legereihenfolge vorschreiben oder bestimmte Varianten ausschließen. In Ermangelung einer Produktionsplanungs-Software, die umfassend alle Aspekte berücksichtigt, lässt sich das für den Legevorgang benötigte Gantt-Diagramm alternativ auf einfache Weise in z. B. Microsoft Project erstellen. Sämtliche benötigten Informationen lassen sich als ASCII-Datei exportieren und bilden mit weiteren für den Ablauf benötigten Metainformationen das *JDF* (**J**ob **D**efinition **F**ile). Diese Datei enthält alle produktionsrelevanten Informationen und stellt somit das „Jobticket“ für den autonomen Herstellungsprozess eines Preforms dar. Ein Beispiel für den Export der für den Legevorgang benötigten Informationen aus dem Gantt-Diagramm aus Abb. 3.65 gibt Listing 3 im Anhang. Wird das JDF vom Legeprogramm verwendet, kann solange autonom produziert werden, wie das System mit verarbeitbaren Zuschnitten versorgt wird. Die zweite Spalte enthält die ablaufsteuernden Tokens: *entrypoint* bezeichnet den Einsprungpunkt für den Legeprozess, das *choice*-Feld kann benutzt werden, um die Beschaffung weiterer Informationen anzufordern, hier z. B. welche der drei Stringerbase-Produktionsvarianten aktiv ist (zusammengefasst zu den Plygroups PG_LB_1-3, PG_LB_4-6 und PG_KB). Bei *break* geht das System in den Wartezustand, da nun die fertiggestellten Preforms abgeräumt werden müssen. Das JDF ist auf einfache Weise erweiterbar und kann so einen Startpunkt für spätere Produktionsplanungssysteme darstellen. Es ist sinnvoll, auch die oben genannten Konturinformationen sowie Greif- und Ablagepunkte mit in das JDF zu packen und so alle Metainformationen in einer Datei zu bündeln.

3.5.5 Saugeraktivierung

Beim Greif- und Ablegeprozess ist es generell nicht sinnvoll, momentan nicht benötigte Sauger zu aktivieren, da zum einen nicht benötigte Zuschnitte angesaugt werden können, was den Preformprozess irreparabel stört, zum anderen kann je nach Konstruktion des Vakuumsystems ein nicht mit Material bedeckter Sauger zum Zusammenbruch der Druckdifferenz im System und letztlich zum Verlust des Zuschnitts führen. Daher müssen und dürfen nur die richtigen Sauger aktiviert werden. Es wurden zwei Varianten getestet: Die zu aktivierenden Saugernummern (Abb. 3.66) wurden dem System explizit mitgeteilt oder das System erkennt anhand der überdeckten Fläche welche Sauger zu aktivieren sind. Das erste Verfahren wurde in Use-Case 1 mit Zuschnitten sehr unterschiedlicher Geometrie angewendet, während das zweite Verfahren im Use-Case 2 mit rechteckigem Greifer auf rechteckigen Zuschnitten erfolgreich getestet wurde. Die Bestimmung der benötigten Sauger ist dabei trivial, der allgemeine Fall kann mit einem Point-in-Contour Test [69] abgedeckt werden, erfordert aber so genaue Kenntnisse über die Greifergeometrie, dass er sinnvollerweise nicht im Zuschnitterkennungssystem sondern in der späteren automatischen Greifplanung angesiedelt sein sollte. Unabhängig vom Verfahren ist es sinnvoll, den Saugern kontinuierliche Nummern zu geben und zu ermitteln, welche Nummern zu aktivieren sind, im Fall von Abb. 3.66 sind das für die markierte Kontur die Saugernummern 3, 5, 6, 7, 8, 9 und 10. Die Nummern können nun beispielsweise binär codiert werden zu dem 16-Bit Wert 0000001111110100, der der Dezimalzahl 1012 entspricht. Diese wird über das aus Abschnitt 3.1.6 bekannte Ethernet-KRL-Kommando `GRIPPER_CFG` an die Robotersteuerung übermittelt. Dort wiederum wird die Zahl binär dekodiert und je nach gesetztem Bit mittels einer greiferspezifischen Umsetzungstabelle der korrekte Digitalausgang des Roboters gesetzt²⁶. Somit ist auch hierfür je Zuschnitt ein Zusatzeintrag in das JDF notwendig.

²⁶Die Nummern der Digitalausgänge stimmen in der Regel nicht mit den Saugernummern überein und sind oft nicht kontinuierlich, so dass diese Umsetzung nötig wird.

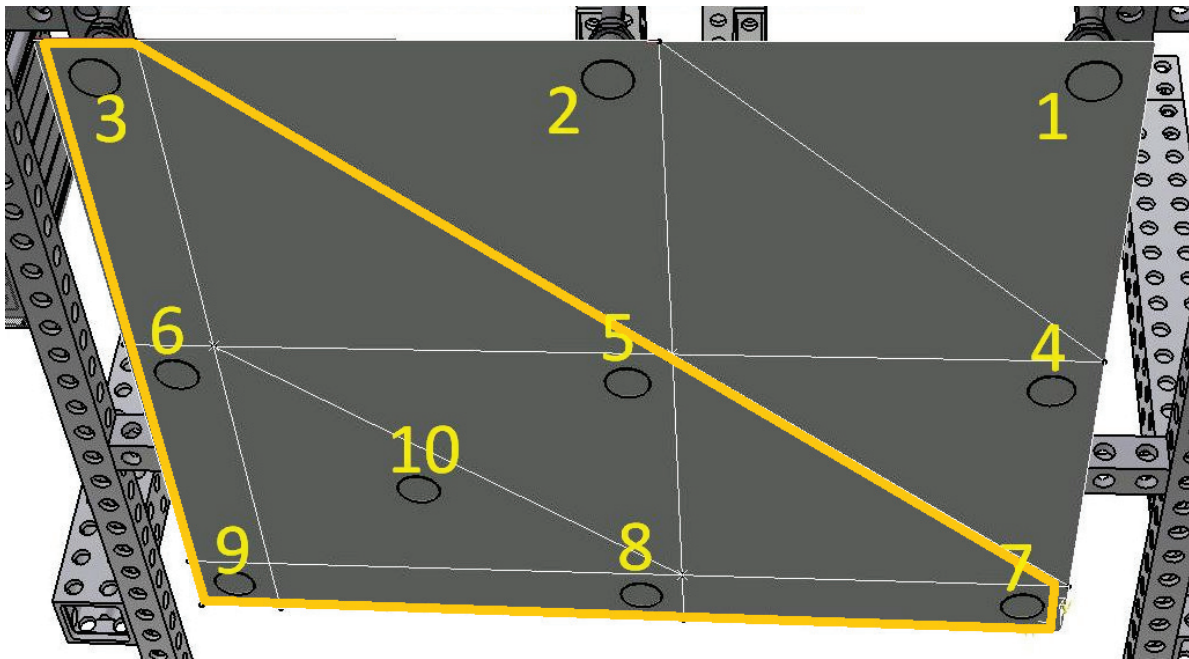


Abbildung 3.66: Vergabe von Saugernummern zur Aktivierung am Beispiel des Zuschnitts Nummer 5 aus Use-Case 2

3.5.6 Heften

Im Fall von fest am Greifer angebrachten Heftern kann analog zum vorangegangenen Abschnitt verfahren werden, es sind lediglich die zusätzlichen Kommandos für den Heftvorgang zu implementieren. Da die Greiferkonstruktion aus Use-Case 3 über eine Ultraschall-Hefteinheit auf einer am Greifer montierten Linearachse verfügt, sind hier im Gegensatz zu festen Hefternummern die achsspezifischen Positionen der Heftpunkte zu übergeben. Im KRL-Programm muss dann entsprechend mit der Information verfahren werden. Mittlerweile wurde eine Testimplementierung für Use-Case 3 vorgenommen und erfolgreich getestet.

3.5.7 JDF-Dateiformat

Die finale JDF-Datei für Use-Case 3 ist insgesamt etwa 6500 Zeilen lang, von denen etwa 75% lediglich auf die Konturen der Plies entfallen. Die Datei beschreibt die Ablage von 108 Zuschnitten und enthält alle in Tabelle 3.6 genannten Metainformationen. Listing 4 im Anhang zeigt die Beschreibung der Plies und Metainformationen in verkürzter Form. Zeile 1 enthält das Magic-Word JDF (**J**ob **D**efinition **F**ile) und die Versionsnummer der Datei, um später problemlos ohne Verlust der Abwärtskompatibilität erweitern zu können. Zeile 2 bis 14 enthalten die Konturdefinitionen der Plies aus dem aus CATIA CPD exportierten XML-File jeweils in 2D (konstanter z-Wert) und 3D. Jeder Zuschnitt erhält einen eindeutigen Identifier aus Zuschnittsnummer, Ply-ID und Cutpiece-ID (Zeile 2 und 8). Grund hierfür ist, dass es, wie oben gesagt, Plies mit und ohne Cutpieces geben kann und dass der Konstrukteur beliebig Namen vergeben kann. Das Produktionssystem muss aber mit eindeutig zu identifizierenden Zuschnitten arbeiten, und der Identifier bildet den Schlüssel hierzu. Dem Identifier folgen Angaben über Fläche und Rand sowie der Centerpoint (hier PlyCenter genannt). Er wird hier einmal festgelegt um eventuelle Mehrdeutigkeiten auszuschließen. In Zeile 16 bis 35 sind TCP (hier DropTCP), Grippoint und Gripshift sowie die Nummern der zu aktivierenden Sauger (beliebig viele GripperBits, Abschluss mit -1) enthalten. Getrennt hiervon in

Zeile 38 bis 43 finden sich die zugehörigen Droppoints, die aus CATIA CPD nach dem Rücktransfer von der Ebene nach 3D stammen. Grippoint, Droppoint, Gripshift und TCP sind in der CATIA-verträglichen Dreibein-Notation angegeben, der Plybook-Reader akzeptiert aber auch eine **frame**-Notation mit z. B. DropTCP.frame x y z A B C, was produktionstechnisch irrelevant, für Tests aber praktisch ist, da Werte aus der Positionsanzeige des Roboters direkt übertragen werden können. Zeile 46 bis 51 beschreibt Lage, Amplitude und Aktivierungszeit der Sonotrode des Hefters für beliebig viele Heftpunkte pro Ply, Abschluss bildet wiederum die -1. In Zeile 54 beginnt die Legeinformation wie in Tabelle 3 beschrieben.

Zusätzlich zur Legereihenfolge, deren Gerüst sich mit nicht unerheblichen Einschränkungen aus dem XML-Plybook gewinnen lässt, werden 16 Einträge pro Ply benötigt. Es stellt sich nun die Frage, wie man ohne die automatische Greif- und Heftplanung auf möglichst einfache Weise zu den fehlenden 1728 Zeilen der JDF-Datei kommt.

3.5.8 Plylander - Assistenzsystem zur Beschaffung der Metainformationen

In Use-Case 1 mit neun Testzuschnitten und Ablage in zwei Dimensionen konnten die Greif- und Ablagepunkte sowie die zu aktivierenden Sauger aufgrund der Überschaubarkeit der Situation problemlos manuell ermittelt werden. Use-Case 2 erforderte die Generierung von Greifpunkten und deren Transformation in Ablagepunkte, was zwar erheblichen Aufwand für die 2D-3D-Transformation der Grippoints in Droppoints bedeutet, ansonsten aber einfach lösbar war, da die Greifpunkte stets mit dem Centerpoint des Zuschnitts übereinstimmten und es nur zwei Varianten für die Saugeraktivierung gab. Use-Case 3 bietet ein komplizierteres Szenario: der Saugerrahmen des Greifers wird in Abhängigkeit von der Zuschnittsgeometrie mehr oder weniger individuell verschoben und rotiert, wodurch sich ein variabler TCP und stets unterschiedliche Saugeraktivierungen und Heftpunkte ergeben, und dies für insgesamt 108 Zuschnitte. Da bis zur Erstellung der Testbauteile noch kein verwendbares Ergebnis aus den parallel zu dieser Arbeit laufenden Forschungsaktivitäten zur automatisierten Greif- und Heftplanung vorlag, wurde zur Beschaffung der benötigten Daten ein anderer Ansatz gewählt: das für das Zuschnittserkennungssystem vorhandene Softwaremodul zum Einlesen von Plybooks wurde mit einer grafischen Ausgabe kombiniert; zusätzlich wurden die als CSV-Tabelle vorliegenden Saugerpositionen sowie mögliche Heftpositionen in das Programm eingelesen. Das Programm wurde dergestalt ausgeführt, dass mittels Hotkeys die Saug- und Heftpositionen rotiert und verschoben werden können (Abb. 3.67). Es erhielt den Namen „Plylander“. Durch die interaktive Bedienung ist es möglich in ca. 45 Minuten das gesamte Plybook durchzuplanen. Das Programm protokolliert die als gut befundenen Einstellungen in eine CSV-Datei (Listing 5 im Anhang ²⁷). Zusätzlich zum TCP kann auch die Gripshift eingestellt werden. Dies erwies sich als nötig, da es Zuschnitte gibt, die in der Form ähnlich einem rechtwinkligen, gleichschenkligen Dreieck sind, aber eine leicht nach innen gekrümmte „Basis“ aufweisen. In diesem Fall liegt der Centerpoint um Bruchteile von Millimetern außerhalb der Zuschnittsfläche und kann aufgrund der Transformationseigenschaften von CATIA/CPD nicht als Grippoint verwendet werden (vgl. 3.5.2). Die Orientierung der Grippoints wurde in Richtung der Koordinatenachsen der Zuschnitte festgelegt, Verdrehungen fließen ausschließlich in den TCP ein. Somit sind die roboterspezifischen 2D-Informationen festgelegt; die 3D-Droppoints erhält man wie in 3.5.3 beschrieben anschließend durch Export nach CATIA/CPD, Geometry-Transfer auf den korrekten Zuschnitt und Reimport in das JDF-File.

²⁷Für DropTCP, GripPoint und GripShift wurde die CATIA-kompatible Dreibeinnotation verwendet.

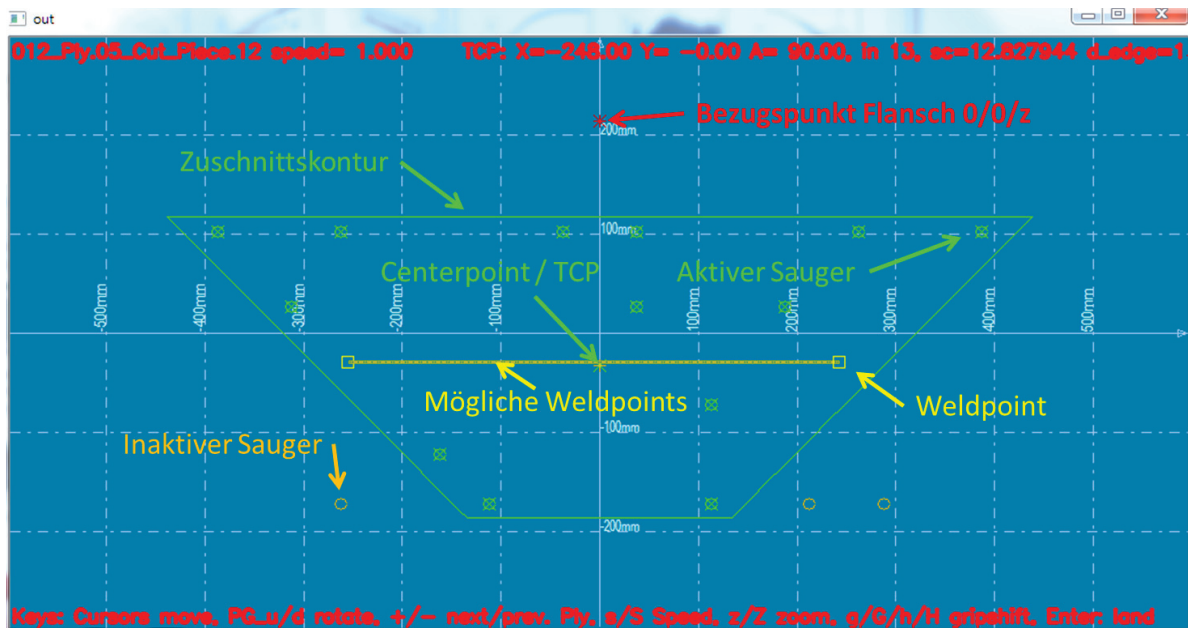


Abbildung 3.67: Screenshot des Plylander-Programms mit Erklärung der verwendeten Symbole

Ebenfalls enthalten in Listing 5 sind ab Zeile 10 die Nummern der zu aktivierenden Sauger, die Verfahrensatznummern der Linearachse für die Heftpunkte sowie Dummy-Einträge für Heftzeit und -amplitude²⁸. Zur Ermittlung der aktiven Sauger sowie der Heftpunkte wurde wie oben schon vorgeschlagen die open-CV-Funktion `pointPolygonTest` [69] verwendet, die den kürzesten Abstand zur Begrenzungskontur vorzeichenbehaftet je nach Lage innerhalb oder außerhalb der Kontur zurückliefert. Unter Kenntnis des Durchmessers der Saugercups ist die Entscheidung, welche Sauger zu aktivieren sind, nun trivial. Analog können mögliche Heftpunkte gefunden werden, und unter der Bedingung, dass zweimal in möglichst großem Abstand, aber nicht näher als 20 mm am Zuschnittsrand geheftet werden soll, kann auch die Bestimmung der Heftpunkte erfolgen. Caveat der Funktion `pointPolygonTest`: es ist nicht klar, auf welchen Teil der Kontur sich der ermittelte kleinste Abstand bezieht. Möchte man die Funktion später einmal für eine automatische Greif- oder Heftplanung verwenden, ist es einfach, die Anzahl der Sauger auf einem gegebenen Zuschnitt zu maximieren, man erhält aber nicht notwendigerweise ein Maß, das über die Symmetrie der Saugerverteilung Aufschluss gibt. Der Funktionswert bezieht sich stets nur auf die nächste Zuschnittskante, Parallelverschiebungen zu dieser Kante ändern den Wert nicht. In diesen Fällen ergeben sich Vieldeutigkeiten, die die numerisch eindeutige Findung eines Minimums erschweren oder sogar unmöglich machen.

²⁸Diese Werte mussten in einer separaten Testreihe ermittelt werden. Im Nachgang stellte sich für Use-Case 3 heraus, dass Amplitude- und Haltezeit nicht wie ursprünglich angenommen ab drei darunterliegenden Lagen stets gleich sind, sondern dass bis zur letzten Lage ein Einfluss aller darunterliegenden Lagen besteht. Um die Anzahl der darunterliegenden Lagen zu ermitteln, hätte man eigentlich die Koordinaten der Heftpunkte im Koordinatensystem des Flattenings mitloggen und analog zu den Grippoints einem Geometry Transfer unterwerfen müssen, was aus Zeitgründen nicht mehr erfolgen konnte. Erneut zeigt sich die enge Verzahnung von Produktion und CAD.

3.5.9 Bedeutung der Metainformationen

In den vorangegangenen Abschnitten konnte gezeigt werden, dass eine automatisierte Produktion, sei sie nun mit einem Zuschnittserkennungssystem ausgestattet oder nicht, zahlreiche Metainformationen benötigt, die nicht im Plybook enthalten sind; ebenso wurde gezeigt, wie man sich diese Informationen mit relativ einfachen Mitteln beschaffen kann. Die Arbeiten hierzu sind in keinsten Weise als abgeschlossen zu bezeichnen, da für ein Produktionsplanungssystem ein weitaus höherer Automatisierungsgrad in der digitalen Prozesskette benötigt wird. Ebenso besteht hohes Potenzial zur weiterführenden Verwendung dieser Ansätze für den robotischen Drapierprozess, ein in dieser Arbeit nicht betrachtetes Thema. Der Reifegrad der o. g. Methoden ist jedoch hoch genug, um die Systemvalidierung anhand von Use-Cases im nächsten Abschnitt zu ermöglichen. Die Funktionsfähigkeit der aufgezeigten Konzepte ist nach der erfolgreichen Herstellung der Use-Case-Preforms als erwiesen anzusehen.

Es kann nicht deutlich genug darauf hingewiesen werden, dass in jeglichem derzeit verfügbaren System für die Offline-Programmierung diese Metainformationen ebenfalls nicht verfügbar sind; damit kann die Offline-Programmierung alleine zum jetzigen Stand der Technik nicht als Plattform zum automatisierten Ablegen von Halbzeugen angesehen werden. Für Subpart-Assembly, wie z. B. das Einbringen der in Use-Case 2 hergestellten Stringerbase-Preforms in den Hautfeld-Preform, kann die Offline-Programmierung hingegen sinnvoll sein: die Varianten sind hierbei weit weniger zahlreich. Auch hier ist, wenn auch in geringerem Umfang, die Beschaffung der relevanten Metainformationen und der korrekte Abgleich von digitaler und realer Welt für die Funktion unabdingbar.

Kapitel 4

Systemvalidierung anhand von Use-Cases

Nach den positiven Ergebnissen von Abschnitt 3.4 wurde das System im realitätsnahen Einsatz anhand von Testbauteilen validiert. Die Herstellung von endkonturnahen Organoblechen sowie die Erstellung einer Stringerbase aus Biax-Gelege in Preformtechnik erschien dafür geeignet. In einem dritten Use-Case konnte das System bei der Herstellung eines thermoplastischen Rumpfschalendemonstratorbauteils eingesetzt und getestet werden. Da, wie in [2] gezeigt, bei der Herstellung von CFK-Bauteilen hoher Kostendruck besteht, ist neben technischen Aspekten auch die Wirtschaftlichkeit zu betrachten, was im vorliegenden Fall die Untersuchung der Prozesszeiten und möglicher Optimierungen beinhaltet.

4.1 Voruntersuchungen: Infiltrierte Platte

4.1.1 Aufbau

Ende 2012 konnten erste Erfahrungen bei der Herstellung einer etwa 100 mal 200 mm großen Platte aus Multiaxialgelege gesammelt werden. Gleich große Zuschnitte werden aufeinander-gestapelt; die Genauigkeitsanforderungen sind gering, da ohnehin eine großzügige nachträgliche Randbesäumung vorgesehen ist. Der Preform wurde im Anschluss von Hand mit einem ZLP-Augsburg-Motiv verziert, das unter einer letzten Decklage einlaminiert wurde und nur in Thermographieaufnahmen sichtbar wird (Abb. 4.1).

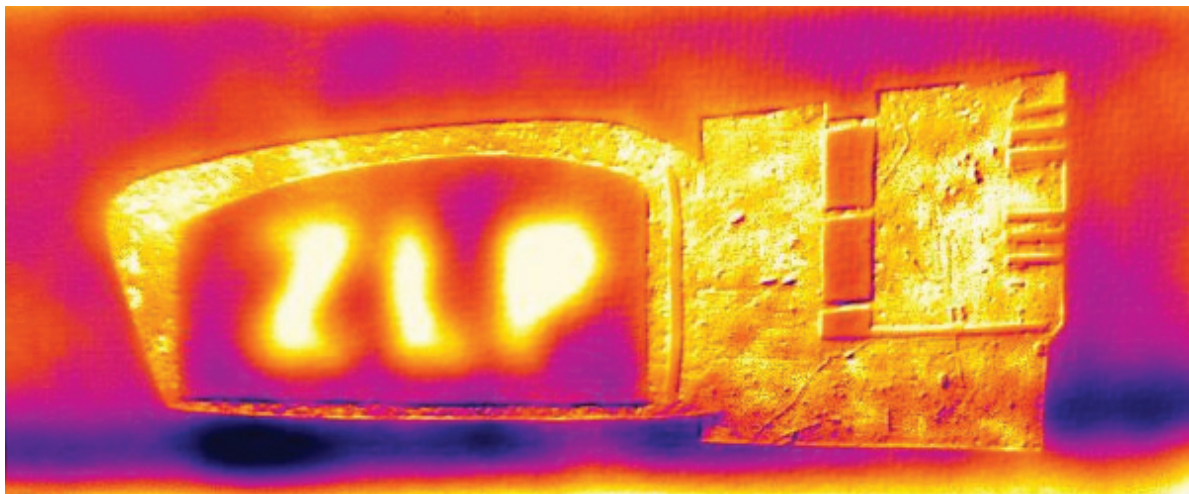


Abbildung 4.1: Thermographieaufnahme der infiltrierten Platte [70]

4.1.2 Ergebnisse

Es konnte eine im Rahmen der Anforderungen hinreichende Genauigkeit von ca. ± 3 mm festgestellt werden. Das System zeigte erstmals die prinzipielle Funktion, und erste Ansätze zu Verbesserungen konnten entwickelt werden.

4.2 Use-Case 1: Preforming endkonturnaher Organobleche aus PEEK-Prepreg

4.2.1 Aufbau

Im Mai 2013 wurden generische Organobleche aus thermoplastischem Gewebe-Prepreg hergestellt (Abb. 4.2). Alle neun Zuschnitte werden von einem Saugerrahmen gegriffen und eben auf denselben Punkt abgelegt, Stöße sind nicht zu beachten. Der eigens hierfür hergestellte Greifer verfügt über eine zentrale Vakuumversorgung mit einzeln schaltbaren Vakuumcups, da sich gezeigt hatte, dass der Unterdruck durch nicht bedeckte Cups unannehmbar stark geschwächt wird und zusätzlich die bereits abgelegten Zuschnitte beim Ablegen kurz angesaugt und so in der Position verändert werden. Zuschnittsgrößen und zu aktivierende Cups wurden manuell in die Zuschnittserkennungs-Software übertragen. Die Nummern der zu aktivierenden Sauger wurden über Ethernet-KRL an den Roboter durchgereicht. Eine Heftfunktion konnte zu diesem Zeitpunkt noch nicht in den Greifer integriert werden.

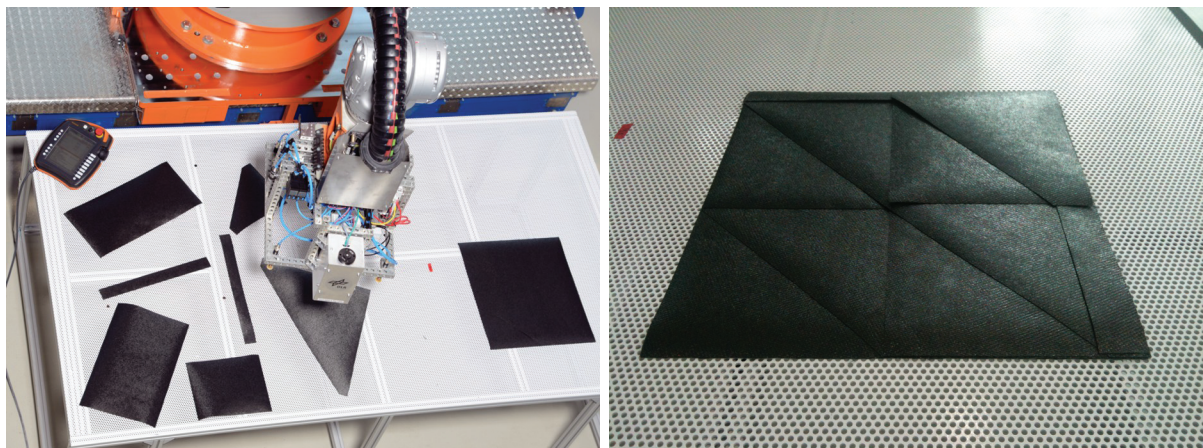


Abbildung 4.2: Use-Case 1: Herstellung eines endkonturnahen Organoblechs, rechts der fertig gelegte Preform

4.2.2 Ergebnisse

Es zeigte sich materialbedingt eine deutliche, nach dem Ablegen reversible Aufwölbung, vor der die Anforderungen an die Ablagegenauigkeit in den Hintergrund treten. Die Systemgenauigkeit ist hier als nicht limitierend einzustufen, daher konnte mit hoher Robotergeschwindigkeit gefahren werden. Das Ablageergebnis wurde im Rahmen der Aufwölbungen mit ca. ± 1 mm als ausreichend bewertet, zu größeren Produktionsfehlern kam es nicht. Es zeigte sich bei etwa 10 % der erstellten Organobleche eine Verwechslung von zwei gleich breiten, schmalen Zuschnitten (in Abb. 4.2 links zu sehen), die sich nur gering in der Länge unterscheiden. Diese Fehler standen eindeutig im Zusammenhang mit dem Lochbild des

Tischs; ein Unterbau aus hellen Styroporplatten schuf zunächst Abhilfe. Im Nachgang konnte dieser Fehler mit der in Abschnitt 3.2.3 gezeigten Methode nachhaltig eliminiert werden.

Für jeweils ein Organoblech wurden neun Zuschnitte abgelegt, die Robotergeschwindigkeit betrug bis zu 70% der Maximalgeschwindigkeit. Es ergab sich eine Verarbeitungszeit von ≈ 17 s pro Zuschnitt, was unter Berücksichtigung von Materialgewicht und -fläche einer Ablegerate von $50,8 \text{ m}^2/\text{h}$ oder $12,1 \text{ kg/h}$ entspricht; gemäß interner Einschätzung besteht hierbei ein Optimierungspotenzial auf 25-30 kg/h. Bedenkt man, dass große Tape- oder Faserlegeanlagen maximale Ablegeraten von 50 bis 100 kg/h erreichen ([3, 4]), so scheint für diese Technik wirtschaftliches Potenzial durchaus vorhanden zu sein. Die Anlage wäre bereits jetzt in der Lage 24 Organobleche pro Stunde zu produzieren, wofür pro Minute etwa drei Zuschnitte zugeführt werden müssen. Da die Zuführung somit eine Limitierung für die erzielbare Gesamtprozesszeit darstellen kann, erscheint zukünftig eine genauere Untersuchung zum Thema Materiallogistik lohnenswert.

4.3 Use-Case 2: Stringerbase-Preforms aus Biax-Gelege

4.3.1 Aufbau

Im Februar 2014 wurde das System am Anwendungsfall einer Unterstützungsstruktur für Stringer (Stringerbase) aus trockenem Biax-Gelege getestet. Die Stringerbases sollten als Sub-Preforms für ein Rumpfschalen-Demonstratorbauteil in einem separaten Arbeitsschritt vorab gefertigt und vorkonsolidiert werden (Abb. 4.3), so dass bei der Herstellung des Rumpfschalen-Preforms nur noch 12 Sub-Preforms anstatt von 96 vergleichsweise kleinen Zuschnitten eingebracht werden müssen. Im Gegensatz zum Organoblech sind hier die Anforderungen höher, da der Sub-Preform so wie er ist im Bauteil verbleibt und abgesehen von der Bauteilkante später nicht mehr besäumt wird. Die Zuschnitte sind im Millimeterbereich gestuft, da zum Hautfeld und an eine Umfangsaufdickung hin von der Bauteilauslegung her Rampen vorgegeben sind (Abb. 4.3 links), d. h. die Gefahr falsch positiver Detektionen ist hier deutlich größer und die erforderliche Ablagegenauigkeit ist höher. Eine weitere Steigerung der Komplexität ergibt sich daraus, dass die Zuschnitte in eine gekrümmte Form abgelegt werden müssen, wozu man sich der in Abschnitt 3.5.3 beschriebenen Methoden bedienen muss.

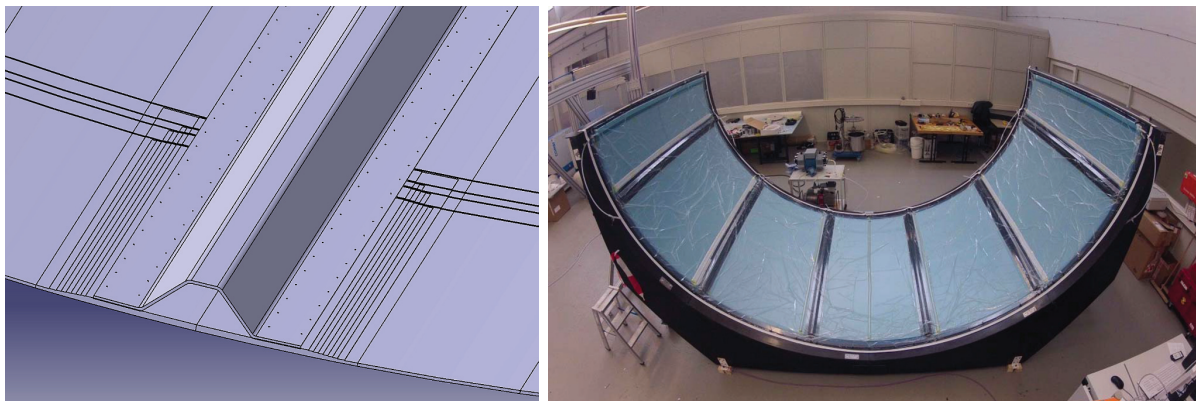


Abbildung 4.3: Use-Case 2: Stringerbase eines Rumpfschalendemonstrators (rechts)

4.3.2 Ergebnisse

Es handelt sich insgesamt um je sechs kurze und sechs lange Preforms, die aus je acht Lagen bestehen. Die Robotergeschwindigkeit wurde im Sinne höchster Genauigkeit auf 30% gesetzt (vgl. 3.3.2); die Zuschnitte wurden mittels autonomem Greifen eben aufgenommen und auf die im Vorfeld bestimmten 3D-Koordinaten automatisiert in die 3D-Form abgelegt (Abb. 4.4).

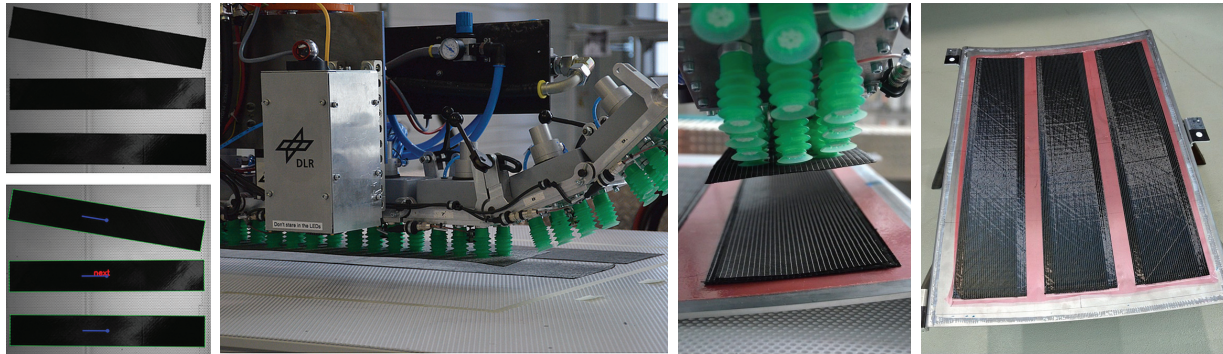


Abbildung 4.4: Herstellung einer Stringerbase-Preform. Detektion, Aufnahme in 2D, Ablage in 3D und Sub-Preforms nach dem Kompaktieren.

Durch die in Abschnitt 3.2.3 beschriebene Methode der Einbeziehung der Kanten konnten die falsch positiven Detektionen auf Null gesenkt werden, was bei insgesamt 96 Zuschnitten die avisierte Rate von $\leq 10^{-6}$ noch nicht belegt (vgl. 3.2.2). Da der Algorithmus zur Kantenerkennung bei dieser Versuchsreihe den ersten Feldtest erfuhr, kam es zu etlichen falsch negativen Detektionen, die allesamt auf Programmfehler zurückzuführen waren und nach Beseitigung dieser „bugs“ am selben Zuschnitt nicht mehr auftraten. Zählt man diese trotz der bugs als Erfolg, so hat man trotz mangelhafter statistischer Beweiskraft dennoch zumindest den Hinweis, dass die geforderten 99% an richtig positiven Detektionen in etwa erreicht werden (vgl. S. 18). Indes trat ein interessanter Fehler auf: Die in Abb. 4.4 zu sehenden, grünen Sauger sind mit kleinen weißen Einsätzen ausgestattet, die in entsprechenden Erhebungen am Sauger eingerastet sind. Genau an dieser Stelle verding sich ein beim Schneiden ausgefranstes, oben aufliegendes Roving, so dass der Zuschnitt beim Abheben des Greifers um mehrere Millimeter verschoben wurde, bevor sich der Roving löste. Um derartig seltene und gänzlich unerwartete produktionstechnische Fehler überhaupt erst zu erkennen, ist es nötig, entsprechend viele Zuschnitte abzulegen. Hinsichtlich der Ablegegenauigkeit konnte visuell festgestellt werden, dass die Zuschnitte gemäß Zeichnung symmetrisch zur Längsachse abgelegt wurden und dass die gewünschte Rampe sauber gestuft war.

Die Verarbeitungszeit pro Zuschnitt betrug ≈ 30 s, die stündliche Ablegerate wurde zu $14,4 \text{ m}^2/\text{h}$ bzw. $3,6 \text{ kg}/\text{h}$ Trockenmaterial bestimmt. Die im Vergleich zu 4.2 deutlich längere Gesamtzeit pro Zuschnitt ist teilweise auf eine etwas langsamere, da genauere Detektion, und zum Großteil auf die längere Transferzeit in die Form zurückzuführen. Zusätzlich tragen die im Durchschnitt geringere Zuschnittsgröße und das kleinere Flächengewicht des Materials deutlich zur Senkung der Legerate bei. Nach unserer Einschätzung ist das Potenzial vorhanden, insgesamt analog zu Abschnitt 4.2 eine Legerate von $25\text{-}30 \text{ kg}/\text{h}$ zu erreichen, sofern man sich auf das gesamte Bauteil aus Faser und Matrix bezieht. Im momentanen Zustand können 13 Preforms pro Stunde abgelegt werden, und auch hier gilt es, ein Konzept für die Materiallogistik zu entwerfen, um das wirtschaftliche Potenzial des Verfahrens aufzuzeigen.

4.4 Use-Case 3: Rumpfschalen-Demonstrator aus thermoplastischem UD-Tape

4.4.1 Aufbau

Im Rahmen des Projekts MAI-Plast [71] des Spitzenclusters MAI Carbon bot sich die Gelegenheit, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Technologien an einem weiteren Use-Case zu erproben und wichtigen Input für die weitere Verbesserung zu erhalten. Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer durchgängigen Prozesskette zur Herstellung von Faserverbundbauteilen mit thermoplastischem Matrixmaterial, geeignet für die Großserie. Das Projekt überspannt die gesamte Prozesskette vom Werkstoff bis zum Bauteil, wobei auch neue und effiziente Herstellungsprozesse entwickelt werden sollen. Ein Demonstratorbauteil des Projekts ist ein Rumpfschalenpanel der Größe 600 x 600 mm aus thermoplastischem UD-Material basierend auf einer PEEK-Matrix (Abb. 4.5).

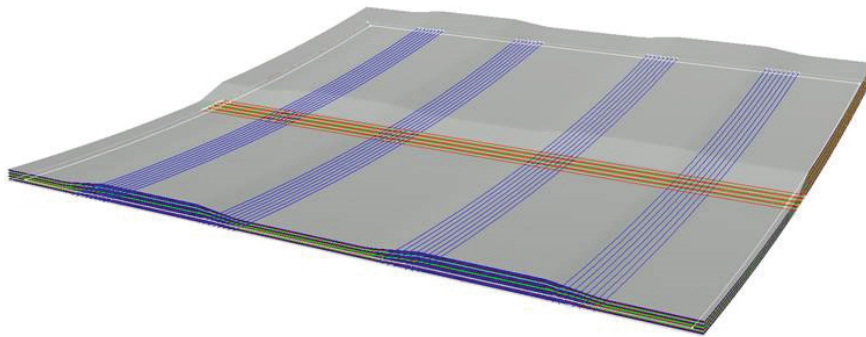


Abbildung 4.5: Layout des Hautfelds aus Use-Case 3 [72]

Schikanen sind hierbei die im hinteren Bereich zu sehende halbseitige Aufdickung sowie die dazu senkrecht verlaufenden lokalen Stringerbase-Aussteifungen. Das Bauteil besteht aus insgesamt 108 Zuschnitten unterschiedlicher Geometrie, die in eine zylindrische Metallform mit Krümmungsradius 3000 mm abgelegt werden. Um ein handhabbares Lagenpaket zu erhalten, werden die Zuschnitte mittels einer Ultraschall-Sonotrode je zweimal pro abgelegtem Zuschnitt miteinander verschweißt; nach dem Preforming wird unter Vakuum im Ofen bei 400°C konsolidiert.

Die Zuschnitte sind dreieckig, rechteckig oder trapezförmig und wiederholen sich mit ähnlicher Größe. Für das Preforming wurde ein Greifer mit 16 schaltbaren Saugern aufgebaut, der geometrisch so ausgelegt wurde, dass jeder Zuschnitt des Plybooks je nach Geometrie mit mindestens drei bzw. vier Saugern gegriffen werden kann (Abb. 4.6). Wie in Use-Case 2 erfolgte die Konstruktion des Lagenaufbaus in CATIA CPD zunächst auf Basis der Idealgeometrie. Die Werkzeugform, die von der Idealgeometrie abweicht, wurde mittels Lasertracker vermessen und durch Flächenrückführung in CATIA modelliert; anschließend wurde ein Skin Swap durchgeführt. Abschließend wurde das Flattening der Zuschnitte auf die Realgeometrie durchgeführt [72]. Mit den so erhaltenen Zuschnittsgeometrien im XML-Plybook wurde das in Abschnitt 3.5 beschriebene Vorgehen durchgeführt. Mittels des Plylander-Programms (siehe 3.5.8) wurden für alle 108 Zuschnitte die Sauger virtuell platziert und Greifpunkte, TCPs, aktive Sauger sowie Heftpositionen ins JDF-File exportiert. Die Greifpunkte wurden wie in 3.5.3 beschrieben in CATIA von 2D auf 3D rücktransformiert und als Ablagepunkte ins JDF übernommen. Die Ablegereihenfolge ergibt sich direkt aus der Reihenfolge der Zu-

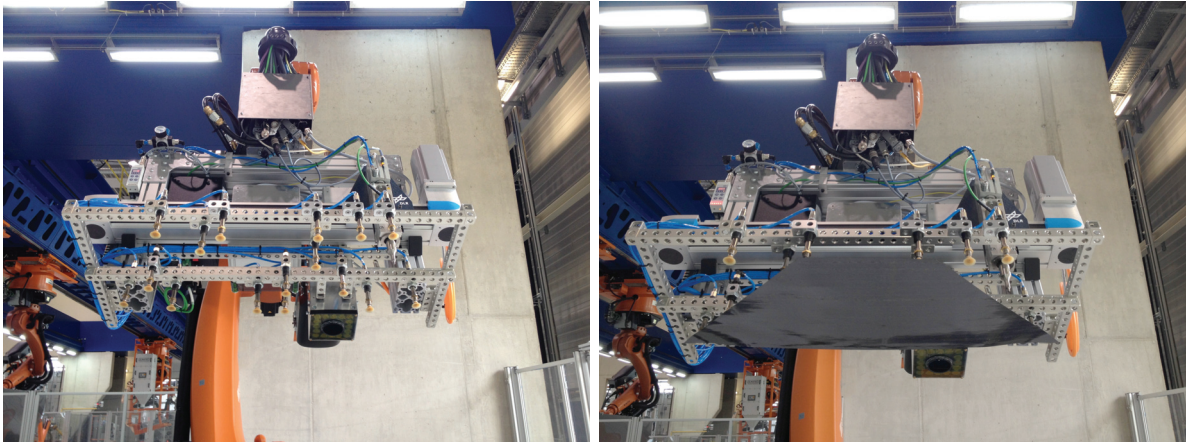


Abbildung 4.6: Für Use-Case 3 verwendeter Greifer, rechts mit Zuschnitt

schnitte im Plybook. Use-Case 3 stellt den anspruchsvollsten Fall dar, da mit variablem TCP gegriffen und in 3D abgelegt wird und stumpfe Stöße die Genauigkeitsanforderung erhöhen.

Zusätzlich zur aus Use-Case 1 bekannten Saugernsteuerung wurden auch die Peripheriegeräte Linearachse und Ultraschallschweißgerät mit angesteuert. Da die Robotersteuerung ebenso wie bei den Saugern keine Kenntnis von Heftpunkten, Schweißzeiten und Strömen hat, werden diese Parameter über zusätzliche Ethernet-KRL-Kommandos vom Ablaufsteuerungsmodul des Zuschnittserkennungssystems, das über das JDF-File alle diese Parameter verfügbar hat, zur Robotersteuerung durchgeschleust. Diese kann dann die betreffenden I/O-Bits richtig setzen und über Feldbus an die Peripherie weitergeben. Die Systemarchitektur wurde hier bewusst wieder so gewählt, dass das in einer Hochsprache programmierte Ablaufsteuerungsmodul das Zuschnittserkennungssystem und den Roboter kommandiert. Es wurde auf eine strikte Trennung der drei Systeme nach ihren speziellen Anforderungsprofilen geachtet, was zu der Implementierung des oben beschriebenen Durchreichens der Prozessparameter führt.

Erstmals wurde bei der Kalibrierung des Systems erfolgreich auf den Lasertracker verzichtet und die auf S. 58 beschriebene Vierpunktmethode eingesetzt. Da eine Vielzahl von Zuschnitten zu legen ist, wurde beschlossen, die Form nicht auf dem Aufnahmetisch, sondern auf einem separaten Schweißtisch zu verankern. Im weiteren Verlauf zeigte sich, dass die Erreichbarkeit der Form durch den Roboter zu optimistisch eingeschätzt worden war, wodurch zusätzlich die Linearachsfahrt des Roboters zu implementieren war. Der Verfahrensablauf gliedert sich dadurch klar in die drei Teile Aufnahme, Transfer und Ablage.

4.4.2 Ergebnisse

Im März 2015 wurden insgesamt drei Hautfeld-Demonstratoren hergestellt. Im Sinne der angestrebten hohen Genauigkeit wurden alle Versuche mit einem Override von 30% durchgeführt (vgl. 3.3.2). Alle Zuschnitte zeigten bei genauerer Untersuchung ein Untermaß im Bereich von 1 mm, was für den stumpfen Stoß eigentlich förderlich wäre, hier aber nicht genutzt werden kann, da sie nicht im CAD vorliegen und somit der Template Matcher den Zuschnitt willkürlich im etwas größeren digitalen Datenbestand platziert. Bis dato ist die Ursache noch nicht gefunden, die Aufklärung ist noch in Arbeit.

Der Template Matcher mit zusätzlicher Kantendetektion zeigte hervorragende Stabilität, obwohl es nötig war, die Schwellwerte aufgrund des Untermaßes der Zuschnitte stark zu reduzieren. Es ergaben sich bei allen drei Hautfeldern keine falsch positiven Detektionen.

Hautfeld eins wurde hinsichtlich der Zuschnittserkennung problemlos gelegt. Hautfeld zwei wurde als Härtetest bei schrägem Sonneneinfall direkt auf den Tisch inklusive Schattenwurf durch die Säulenkonstruktion der Roboterzelle gelegt. Trotz der für Bildverarbeitung sehr schwierigen Bedingungen wurden alle Zuschnitte bis auf einen korrekt erkannt. Dieser Zuschnitt lag zu 1/3 in der Sonne und zu 2/3 im Schatten und konnte nach Schließen des Rollos sofort problemlos erkannt werden. Da Zuschnitte in der prallen Sonne auch problemlos erkannt werden, sollte man also lediglich diesen Grenzfall meiden. Bei Hautfeld drei fand eine zweite Fehldetektion statt. Hierbei spiegelte sich die Hallenbeleuchtung unglücklich am Rand des Zuschnitts. Der Template Matcher zeigte sich robust und erkannte den Zuschnitt, die Kantendetektion hingegen ging dahingehend fehl, dass sie die Zuschnittskante durch die Reflexion als so weit innen liegend erkannte, dass der Zuschnitt aufgrund zu hoher Abweichungen verworfen wurde. Es zeigt sich, dass bei der Kantendetektion das Fehlerhandling noch verbesserungsfähig ist. Mit zwei falsch negativen Fehldetektionen auf insgesamt 324 Zuschnitte liegt man mit einer Detektionsrate von 99,4% im Vergleich zu den geforderten 99% (vgl. S. 18) im spezifizierten Bereich. Die Rate von Null falsch positiven Detektionen ist erfreulich, aber für das Ziel von $\leq 10^{-6}$ noch nicht hinreichend belegbar (vgl. 3.2.2). Deutlich störender, da mit etwa 15 Fällen häufiger, waren Stopps aufgrund von Fehlern beim Heften. Da die Heftparameter noch nicht abschließend ermittelt waren, ergaben sich gelegentlich Fälle, in denen die Sonotrode die gewünschte Energie nicht einkoppeln konnte und einen Fehler meldete, der schließlich zum Stopp führte. Hier ist eine genauere Betrachtung des Fehlerhandlings nötig, da der Fehler bei aufgesetzter Sonotrode eintritt und die Linearachse dann zum Schutz von Equipment und Bauteil nicht verfahren werden darf. Hier ist zusätzlicher Aufwand nötig, um die gewünschten Verfügbarkeiten zu erreichen; dieser war im Rahmen der Versuchszeit leider nicht mehr zu leisten. Für die gelegten Preforms ergibt sich final ein Bild gemäß Abb. 4.7.

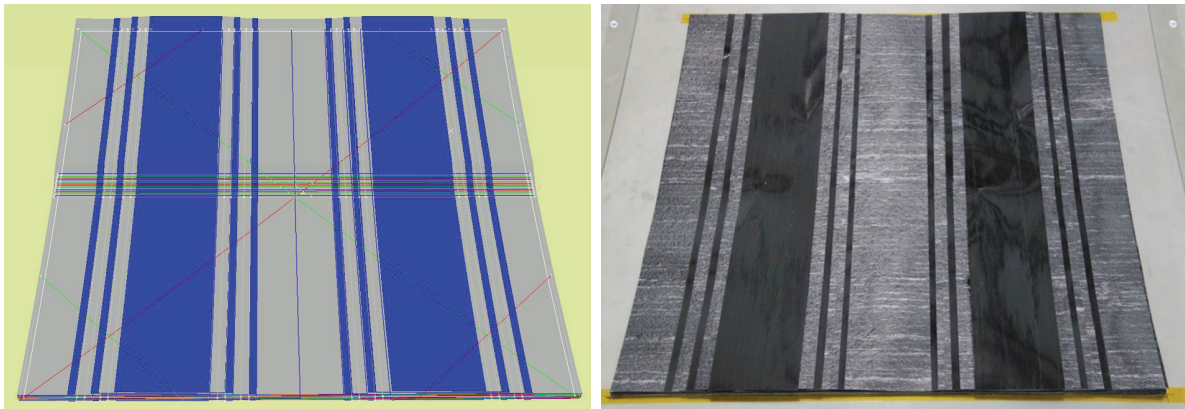


Abbildung 4.7: Use-Case 3: Thermoplastisches Hautfeld im CAD und als fertiger Organoblech-Preform

Während der Ablage wurden die Ablegegenauigkeiten stichprobenartig mit dem Stahlbandmaß kontrolliert und zeigten im Rahmen der Messgenauigkeit gute Übereinstimmung mit den in Abschnitt 3.4.6 festgestellten Werten. In höheren Plies stellte sich zunehmend Überlapp an den Stoßstellen ein, da die Preformdicke in eklatanter Weise nicht mit den aus der Dickenmessung einzelner Lagen ermittelten Werten übereinstimmt. Der Preform dickt überproportional auf, was dazu führt, dass die höheren Lagen nicht genug verkürzt werden, um frei von Überlapp zu legen. Interessant in diesem Zusammenhang wäre es, die Setzung beim Konsolidieren zu betrachten; es stellt sich die Frage, was nun richtig ist: Preform oder

konsolidiertes Bauteil, und: kann der multipel geheftete Preform beim Konsolidierungsprozess so weit nachgeben, dass die intendierte Ablageposition erreicht wird? Die Antwort auf diese Fragen wird im Rahmen dieser Arbeit leider ausbleiben müssen, würde sie doch weit vom Thema weg führen.

Hinsichtlich der erzielten Prozesszeiten lässt sich feststellen, dass für die Ablage eines Zuschnitts etwa 75 Sekunden benötigt werden. Dies ist ein erheblicher Unterschied verglichen mit den in Use-Case 1 festgestellten 17 Sekunden. Wie bereits bei der Stringerbase aus Use-Case 2 wurde hier zur Genauigkeitssteigerung eine zweite Detektion (vgl. Abschnitt 3.4.1) vorgenommen, ebenso wurde nach der Ablage eine dritte Aufnahme zur Qualitätssicherung angefertigt. Aufgrund der Größe der Zuschnitte verlangsamt sich die Detektion, auch sind die betreffenden Positionen erst anzufahren, was zu weiteren zeitlichen Einbußen führt. Zusätzlich mussten je Zuschnitt zwei Heftpunkte gesetzt werden, was mit jeweils mehreren Sekunden zu Buche schlägt. Als letzter Faktor konnten schließlich die relativ langen Transferwege vom Aufnahmetisch zur Form identifiziert werden, die insbesondere bei hohen Winkeldifferenzen kritisch werden. Anhand eines beispielhaften Zuschnitts sind die Zeiten in Tabelle 4.1 aufgeschlüsselt.

4.5 Bewertung

Nach Durchführung der Legeversuche lässt sich feststellen, dass das vorliegende Verfahren für alle Use-Cases geeignet ist. Die untersuchten Bauteile wurden mit hoher Zuverlässigkeit im Rahmen der erwarteten Toleranzen hergestellt; Optimierungspotenziale wurden aufgezeigt. Eine wichtige Frage in diesem Zusammenhang ist die nach der erzielbaren Ablegeleistung. Laut [4] wird aufgrund der zur Befriedigung der Nachfrage benötigten Kadenzen von 40 Flugzeugrumpfen pro Monat eine Ablegeleistung von 287 kg fertige Struktur pro Stunde benötigt; konkurrierende Verfahren wie Tapelegen erreichen derzeit Legeleistungen bis zu 70 kg/h. Um das untersuchte Verfahren einzuordnen und Verbesserungspotenziale zu erkennen, wurden repräsentative Zeiten für die einzelnen Prozessschritte ermittelt. Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die aktuell nachgewiesenen Prozesszeiten je Zuschnitt jeweils mit und ohne abschließende QS-Aufnahme.

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der Prozesszeiten pro Zuschnitt (alle Zeiten in Sekunden)

	Organoblech	Stringerbase	Hautfeld	Ziel
Detektion 1	1,5	4,5	5	1
Positionieren	1	1	1	1
Detektion 2	1,5	4,5	5	1
Aufnehmen	6	8	9	2
Transfer	2	9	13	2
Ablegen	2	2	3	1
Heften	-	-	16	10
Abheben	1	1	3	1
Positionieren	-	6	11	-
QS-Aufnahme	-	4	3	-
Transfer	2	5	6	2
\sum mit QS	21	45	75	24
\sum ohne QS	17	35	61	21

Auffällig ist, dass die Prozesszeit von Use-Case 1 zu Use-Case 3 deutlich ansteigt. Dies ist im Wesentlichen auf verlängerte Zeiten für Detektion und Transferbewegung zurückzuführen. Der Anstieg in der Detektionszeit liegt im Wesentlichen an der Zuschnittsgröße. Hier ist, wie auf Seite 30 bereits angemerkt, noch Optimierungsarbeit zu leisten; durchaus vorstellbar ist eine Detektionszeit im Bereich von einer Sekunde. Bezüglich der Transferzeiten lässt sich anmerken, dass in Use-Case 1 der Roboter-Override 70 % betrug, wohingegen für die anderen Use-Cases aufgrund der gesteigerten Genauigkeitsanforderungen der Override nur auf 30 % eingestellt war (vgl. 3.3.2). Durch die in 3.4.4 beschriebene Driftkompensation kann die gewünschte Genauigkeit wahrscheinlich auch bei höheren Geschwindigkeitsprofilen erreicht werden, was in den beiden letzteren Use-Cases keine Anwendung finden konnte, da dedizierte Versuche hierzu noch ausstehen. Obwohl somit die Transferzeiten deutlich reduziert werden können, ist dies nur ein Teil des gesamten Optimierungspotenzials. Auffällig ist, dass vor allem in Use-Case 3 die Transferwege sehr lang und aus mehreren Bewegungen zusammengesetzt sind. Hier ist eine Verkürzung der Wege in Verbindung mit einer Reduktion der Bewegungen anzustreben. Verbleibende Bewegungen sollten weitestmöglich ineinander übergehen, z. B. sollte sich die Transferbewegung nahtlos an die Aufnahmebewegung anschließen. Durch diese Maßnahmen könnte die Transferzeit wieder auf etwa zwei Sekunden sinken. Weiterhin stellt man fest, dass nur in Use-Case 3 geheftet wurde, was das Bild verzerrt. Da davon auszugehen ist, dass für den Preformingprozess stets ein Anheften der Lagen untereinander nötig sein wird, dass aber auch noch Optimierungspotenzial vorhanden ist, so kann man schätzen, dass etwa 10 Sekunden Heftzeit unabhängig vom Use-Case anfallen werden. Nach Ausnutzung aller Optimierungspotenziale könnte man mit der Prozesszeit letztlich in die Größenordnung von 20 s pro Zuschnitt kommen. Für die Legeraten ergibt sich somit ein Bild gemäß Tabelle 4.2.

Tabelle 4.2: Legeraten mit und ohne QS-Aufnahme

	Organoblech	Stringerbase	Hautfeld	Ziel
Zuschnitte / Preform	9	8	108	t.b.d.
Flächengewicht [g/m^2]	238	250	270	250
ØFläche [m^2]	0,24	0,14	0,15	2
Preforms / h	19/ 24	10/ 13	0,44/ 0,55	t.b.d.
Ablegerate [m^2/h]	41,1/ 50,8	11,2/ 14,4	7,2/ 8,9	300/ 343
Ablegerate [kg/h]	9,8/ 12,1	2,8/ 3,6	1,9/ 2,4	75/ 86

Es ist klar ersichtlich, dass die Legeraten des Preforming-Prozesses weit unter den in [4] geforderten und der aktuellen Legerate von Tapelegern liegen. Eine Erhöhung in die gewünschte Größenordnung ist auch nach zeitlicher Optimierung nur durch das Ablegen größerer Zuschnitte oder durch Erhöhung des Flächengewichts möglich. Nimmt man bei ähnlichem Flächengewicht des Materials eine Zuschnittsfläche von $2 m^2$ an, so könnte man mit der optimierten Prozesszeit ca. $80 kg/h$ erreichen und so final in die gewünschte Größenordnung vorstoßen. Es ist folglich für große Preforms eine gute Strategie, den in Use-Case 2 beschrittenen Weg des externen Preformings von kleineren Unterbaugruppen mit anschließender Subpart-Assembly am großen Preform durchzuführen, da sich die ineffiziente Ablage kleiner Zuschnitte so nicht auf die Formbelegungszeit auswirkt. Für das Subpart-Preforming sollte dabei eine hinreichend kostengünstige Plattform gewählt werden.

Für alle Use-Cases gilt gleichermaßen, dass die Materiallogistik zum Problem wird, da die Anlage im Minutentakt gestoppt werden muss, um manuell Material nachzufüttern. Aus

produktionstechnischer Sicht ergibt sich so eine unvertretbare gegenseitige Blockierung von Arbeitsschritten. Zukünftig sollte folglich der Materialfluss zur und von der Anlage mit betrachtet werden, und es sind Konzepte für einen möglichst kontinuierlichen Materialfluss zu entwickeln.

Kapitel 5

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde aufgezeigt, wie mit einem Industrieroboter biegeschlaiffe Carbonfaser-Halbzeuge mit stets veränderlichen Geometrien autonom, d. h. ohne Mitwirkung von Menschen, zu Preforms verarbeitet werden können. Dazu wurde ein auf diesen Anwendungsfall abgestimmtes Bildverarbeitungssystem entwickelt, getestet und hinsichtlich der Verlässlichkeit der Detektion sowie erzielbarer Genauigkeiten validiert. Für den automatisierten Preform-Aufbau wurde ein prototypischer digitaler Workflow entworfen, eine minimalistische Ablaufsteuerung implementiert und die Systemintegration der drei Komponenten Ablaufsteuerung, Bildverarbeitungssystem und Robotersteuerung vorgenommen. Anschließend wurde das System in drei Anwendungsfällen unterschiedlichen Schwierigkeitsgrads zur Preformerstellung eingesetzt.

Als besonders wichtig für die Verlässlichkeit der Detektion stellte sich die Vermeidung von Reflexionen des diesbezüglich sehr anisotropen Materials heraus. Dies wurde durch den Einsatz einer weitgehend umgebungslichtunabhängigen Beleuchtung und den Einsatz von gekreuzten Polfiltern zur Eliminierung der Oberflächenreflexionen erreicht. Das gesamte Bildfeld des Kamerasystems beträgt bei einem Arbeitsabstand von 1 m etwa $2,3 \times 1,6$ m, wodurch starke geometrische Korrekturen am Bildmaterial vorgenommen werden müssen. Die geometrischen Abweichungen der korrigierten Bilder wurden in einem Bereich von $1,4 \times 1,0$ m in der Mitte des Kamerabildes vermessen; sie betragen im Mittelwert $\mu=0,15$ mm und sind zur Bildmitte hin deutlich unterhalb von 0,1 mm und somit für den Einsatzzweck ausreichend.

Bei der Untersuchung des Gesamtsystems aus Industrieroboter, Greifer und Bildverarbeitungssystem zeigte sich eine Vielzahl von sich überlagernden Einflüssen, die neben den ausführlich untersuchten optischen Effekten auch mechanische Abweichungen durch Temperaturänderungen von Kamera, Robotergestell und Antrieben beinhalten. So unterliegen die Messwerte des Kamerasystems einer starken Drift im Bereich von 1 mm mit einer Zeitkonstanten im Bereich von 45 Minuten. Es wurde nachgewiesen, dass diese Drift mit einer Temperaturerhöhung der Kamera um 10°C im eingeschwungenen Zustand einhergeht und es wurde ein Weg entwickelt und verifiziert, wie durch Referenzierung bei jeder zweiten Aufnahme die Drift um den Faktor 10 auf 0,1 mm reduziert werden kann. Weiterführende Maßnahmen wie eine Temperierung des Kamerasystems sind derzeit in Arbeit. Die thermische Drift des Robotergestells erwies sich mit $65\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ als wenig ausgeprägt und durch Temperierung des Raums beherrschbar. Schwerwiegenderen Einfluss hat die thermisch induzierte Drift der Roboterantriebe inklusive deren Getrieben, da erst nach etwa fünf Stunden ein stabiler Zustand erreicht wird, der zusätzlich vom in dieser Zeit gefahrenen Lastprofil abhängt und somit schwer kontrollierbar ist. Für die in unseren Anwendungsfällen vorgefundenen geringen Lasten beträgt der Effekt etwa 0,35 mm nach zwei Stunden und ist somit nicht

dominant, aber für die Langzeitstabilität erheblich störend. Diese Einflüsse sind Gegenstand weiterer Untersuchungen, da unser Ziel die Erweiterung der zulässigen Betriebsbedingungen auf eine typische Industrieumgebung und der Nachweis der dafür nötigen Prozessstabilität ist. Aufgrund der hohen Zeitkonstanten im Bereich von mehreren Stunden ist der Zustand kurzfristig stabil genug für die Produktion. Im Rahmen dieser Arbeit wurde in Abschnitt 3.3.3 ein Weg aufgezeigt, wie das System ohne zusätzliche Messmittel in wenigen Minuten nachkalibriert werden kann, um diese langfristige Drift zu kompensieren.

Unter Kenntnis des Driftverhaltens und damit seiner Vermeidung konnten die kumulierten Genauigkeiten von Positionsbestimmung, Greifen und Ablegen quantifiziert werden. Zum derzeitigen Stand kann klar festgestellt werden, dass unter optimalen Bedingungen eine Gesamtgenauigkeit im Bereich von $\pm 0,5$ mm bei einer Standardabweichung von $\sigma = 0,2$ mm erreicht wird. Diese Bedingungen bestehen aus optimaler Kalibrierung, Vermeidung von thermischer Drift sowie Verwendung eines Materials, das sich nicht durch intrinsische Verformung vom Aufnahmetisch abhebt. Bei schlechten Bedingungen arbeitet das System weiterhin sauber und überaus robust, wobei die Genauigkeit im Bereich von 1-2 mm liegt. Da diese Genauigkeiten für die avisierten Anwendungen jeweils ausreichend sind, wurde das System für den automatisierten Preformaufbau in den Use-Cases generisches Thermoplast-Organoblech, Stringerbase-Preform aus Biax-Trockengelege und thermoplastischer Rumpfschalendemonstrator angewendet. Damit wurde nachgewiesen, dass die Kombination eines Industrieroboters mit einem Bildverarbeitungssystem als sinnvolle Automatisierungslösung in der CFK-Produktion eingesetzt werden kann.

Betrachtet man die erreichbaren Legeraten, so sind sie für die betrachteten Anwendungsfälle ausreichend. Die Hochskalierung auf größere Preforms bietet eine ermutigende Perspektive zur Steigerung der abgelegten Masse, jedoch ist eine detaillierte Betrachtung unter Berücksichtigung der Anlagenkosten unbedingt anzuraten. Bereits in den Use-Cases wurde klar, dass die Materiallogistik zum Flaschenhals werden kann. Für einen Einsatz in der Produktion sind Fragen der Materialversorgung unabdingbar wichtig und in die Systemauslegung mit einzubeziehen.

Anhand eines prototypischen digitalen Workflows konnte der autonome Preformaufbau auf Basis von Plybook-Daten und weiterer Metainformationen dargestellt werden. Durch die sich beim Preformaufbau einstellende unmittelbare Notwendigkeit nach im Plybook fehlenden Informationen konnten die benötigten Metainformationen festgestellt und Wege zu deren Ermittlung aufgezeigt werden. Für die Use-Cases 2 und 3 wurde ein Job Definition File (JDF) mit allen produktionsrelevanten Informationen erstellt und für die Ablaufsteuerung der autonomen Preformproduktion verwendet. Quasi als „Spin-Off“ konnte die Vorgehensweise für weitere Projekte am ZLP übernommen und ebenfalls erfolgreich getestet werden. Somit konnte ein wichtiger Baustein für die Automatisierung von roboterbasierten Produktionsprozessen für variantenreiche Produkte geschaffen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] O. Rüger, „Preforming: Stand der Technik & Ausblick“, Vortrag in der Arbeitsgruppe Fertigungstechnik des Carbon Composites e.V. am 13.11.2009, http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/gruppen/12/08/30/02_ag_mph_131109_standtechnik_14062011.pdf, abgerufen am 24.12.2014
- [2] G. Berchtold, „Innovatives CFK-Fertigungsverfahren unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten“, Präsentation auf dem DLR-Wissenschaftstag, Braunschweig, 11. 10. 2007
- [3] G. Berchtold, R. Schimkus, K. Schulte, „Automatisierungstechnologien für große CFK-Strukturen der Luftfahrt“, Lightweight Design, Ausgabe 4/5/2009, S. 72 ff.
- [4] W. Dudenhausen, „Automatisierung und Qualitätssicherung in der Produktionstechnik im ZLP-Augsburg“, Präsentation auf dem 1. Augsburger Produktionstechnik Kolloquium, Augsburg, 18.05.2011
- [5] M. Kuehnel, A. Schuster, A. Buchheim, T. Gerngross and M. Kupke, „Automated near net-shape Preforming of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics (CFRTP)“, Paper for the ICS of the JEC Europe 2014, Paris, March 11-13, S. 2 f.
- [6] A. Schuster, „Computer Vision für die CFK-Produktion - Autonomes Greifen von individuellen Preforms“, Vortrag in der Arbeitsgruppe Automatisierung des Carbon Composites e. V., 27.03.2014
- [7] A. Schuster, T. Schmidt, „Computer Vision für die CFK-Produktion: Autonomes Greifen von individuellen Preforms“, Kongressbeitrag Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2014, Document-ID 340022
- [8] M. Kühnel, A. Schuster, A. Buchheim, M. Kießig, T. Gerngross, M. Kupke, „Automatisiertes endkonturnahes Preforming carbonfaserverstärkter Thermoplaste mittels robotischer Halbzeugablage“, Kongressbeitrag Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2014, DocumentID 340052
- [9] G. W. Ehrenstein, „Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften“, Hanser-Verlag, 2006
- [10] H. Jäger, T. Hauke, „Carbonfasern und ihre Verbundwerkstoffe: Herstellungsprozesse, Anwendungen und Marktentwicklung“, Verlag Moderne Industrie, 2010
- [11] Projekthomepage MAI-Design der Spitzencluster-Initiative MAI Carbon, <http://www.mai-carbon.de/index.php/de/cluster-organisation/projekte/mai-design>, abgerufen am 25.12.2014

- [12] „Leitlinien zur Arbeitsstättenverordnung“, ISBN 3-936415-38-2, März 2009, S. 22f, <http://lasi.osha.de/docs/lv40.pdf>, abgerufen am 24.12.2014
- [13] DIN 16536-1, Prüfung von Drucken und Druckfarben der Drucktechnik - Farbdichtemessungen an Drucken - Teil 1: Begriffe und Durchführung der Messung, 1997
- [14] Wikipedia-Eintrag „Lux (Einheit)“, http://de.wikipedia.org/wiki/Lux_%28Einheit%29, abgerufen am 28.12.2014
- [15] Homepage „OpenCV (Open Source Computer Vision)“, <http://www.opencv.org>, abgerufen am 28.12.2014
- [16] C. Harris, M. Stephens, „A combined corner and edge detector“, Fourth Alvey Vision Conference, 147–151, Manchester, UK, 1988
- [17] H. Moravec, „Obstacle Avoidance and Navigation in the Real World by a Seeing Robot Rover“, Tech Report CMU-RI-TR-3 Carnegie-Mellon University, Robotics Institute, 1980
- [18] S. M. Smith, J. M. Brady, „SUSAN - a new approach to low level image processing“, International Journal of Computer Vision 23 (1): 45–78, May 1997
- [19] D. G. Lowe, „Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints“, International Journal of Computer Vision, IJCV, 60(2):91–110, 2004
- [20] R. B. Rusu, S. Cousins, „3D is here: Point Cloud Library (PCL)“, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Shanghai, China, 2011
- [21] S. Suzuki, K. Abe, „Topological Structural Analysis of Digital Binary Images by Border Following“, CVGIP, v.30, n.1. 1985, pp. 32-46
- [22] J. F. Canny, „A computational approach to edge detection“. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8(6):679–698, 1986
- [23] J. P. Lewis, „Fast Template Matching“, Vision Interface, pp. 120-123, 1995
- [24] C. Echerer, M. Schönert, A. Schuster, „Verfahren zur Regelung von drucktechnischen Prozessen“, DE 102007007447A1, Offenlegungsschrift, 2007
- [25] M. Reich, „Rotationsinvariantes Pattern Matching in der CFK-Produktion“, Bachelorarbeit an der Universität Augsburg und DLR ZLP, 2013
- [26] M. Hu, „Visual Pattern Recognition by Moment Invariants“, IRE Transactions on Information Theory, 8:2, pp. 179-187, 1962
- [27] F. Krebs, „Kommunikationsmöglichkeiten mit dem Roboter“, interner Vortrag, 2011
- [28] KUKA Roboter GmbH, „KUKA.RobotSensorInterface 3.1 Für KUKA System Software 8.2“, 02.12.2010
- [29] Wikipedia-Eintrag „User Datagram Protocol“ http://de.wikipedia.org/wiki/User_Datagram_Protocol, abgerufen am 02.01.2015
- [30] Wikipedia-Eintrag „OLE for Process Control“ http://de.wikipedia.org/wiki/OLE_for_Process_Control, abgerufen am 02.01.2015

- [31] KUKA Roboter GmbH, „KUKA.EthernetKRL 2.2 für KUKA System Software 8.2 und 8.3“, 19.11.2012
- [32] Wikipedia-Eintrag „Transmission Control Protocol/Internet Protocol“, http://de.wikipedia.org/wiki/Transmission_Control_Protocol/Internet_Protocol, abgerufen am 02.01.2015
- [33] KUKA Roboter GmbH, „KUKA System Software 8.2, Bedien- und Programmieranleitung für Systemintegratoren“, 19.06.2012, S. 325 f.
- [34] L. C. Larsen, DLR, persönliche Mitteilung, 2013
- [35] Z. Zhang, „A Flexible New Technique for Camera Calibration“, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11):1330-1334, 2000
- [36] Z. Zhang, „On the Epipolar Geometry Between Two Images With Lens Distortion“, Proc. Int'l Conf. Pattern Recognition (ICPR), Vol. I, pp. 407–411, Aug. 1996, Vienna
- [37] „Camera Calibration and 3d Reconstruction“, OpenCV 2.4.9.0-Dokumentation, http://docs.opencv.org/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html, abgerufen am 20.08.2014
- [38] J. Y. Bouguet, „MATLAB calibration tool.“, http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc, abgerufen am 20.08.2014
- [39] cornerSubPix, OpenCV 2.4.9.0-Dokumentation, http://docs.opencv.org/modules/imgproc/doc/feature_detection.html?highlight=cornersubpix\#void\%20cornerSubPix\%28InputArray\%20image,\%20InputOutputArray\%20corners,\%20Size\%20winSize,\%20Size\%20zeroZone,\%20TermCriteria\%20criteria\%29, abgerufen am 03.01.2015
- [40] fisheye-undistortimage, OpenCV 2.4.9.0-Dokumentation, http://docs.opencv.org/trunk/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html#fisheye-undistortimage, abgerufen am 03.01.2015
- [41] T. Fawcett, „ROC Graphs: Notes and Practical Considerations for Data Mining Researchers“, HP Laboratories Palo Alto, HPL-2003-4, 2003
- [42] S. Dutta, T. Schmidt, L. Larsen, „Kantenmessung eines Zuschnittes in der automatisierten Fertigungsprozesskette“, Vortrag in der Arbeitsgruppe Werkstoff- und Bauteilprüfung des Carbon Composites e. V., 15.02.2013
- [43] B. Iglewicz and D. Hoaglin, „How to Detect and Handle Outliers“, The ASQC Basic References in Quality Control: Statistical Techniques (Editor: Edward F. Mykytka, Ph.D.), Volume 16, 1993
- [44] R. Bischoff, „Verfahren und Vorrichtung zum Verbessern der Positioniergenauigkeit eines Handhabungsgeräts“, DE102004026814A1, Offenlegungsschrift, 2005
- [45] Somen Dutta, DLR, persönliche Mitteilung, 2011
- [46] Hexagon Metrology, Produktbroschüre „Leica Absolute Tracker AT901“, <http://www.leica-geosystems.de>, abgerufen am 20.08.2014

- [47] KUKA Roboter GmbH, „KR C2 / KR C3 Expert Programming, KUKA System Software (KSS) Release 5.2”, 26.09.2003
- [48] Wikipedia-Eintrag „Helmert-Transformation” <http://de.wikipedia.org/wiki/Helmert-Transformation>, abgerufen am 08.01.2015
- [49] A. Huamán, „Features2D + Homography to find a known object”, OpenCV 2.4.11.0-Dokumentation, http://docs.opencv.org/doc/tutorials/features2d/feature_homography/feature_homography.html#feature-homography, abgerufen am 25.03.2015
- [50] Thomas Block, Themensammlung Messtechnik, <http://www.block-net.de/messtechnik/p-messtechnik.html>, abgerufen am 18.11.2014
- [51] Wikipedia-Eintrag „Relaxation (Naturwissenschaft)”, http://de.wikipedia.org/wiki/Relaxation_%28Naturwissenschaft%29, abgerufen am 16.02.2015
- [52] A. Schuster, „Übergang von Antiferromagnetismus zu non Fermi liquid in $\text{Ce}_{1-x}\text{M}_x\text{Cu}_5$ (M=La,Pr)”, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Experimentalphysik III, Universität Augsburg, Mai 1995
- [53] Website Otto Kälin Formenbau, Eigenschaften von Aluminiumgusslegierungen, http://www.formteile.ch/alu_legierungen.php, abgerufen am 10.03.2015
- [54] Somen Dutta, DLR, persönliche Mitteilung, 2013
- [55] Projektbeschreibung MAI-ZPR, Homepage der Spitzencluster-Initiative MAI-Carbon, <http://www.mai-carbon.de/index.php/de/cluster-organisation/projekte/produktionssysteme/mai-zpr>, abgerufen am 30.03.2015
- [56] I. N. Bronstein, K. A. Semendjajew, „Taschenbuch der Mathematik”, Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt / Main (1989), S. 607 ff.
- [57] J. Mathews, R. L. Walker, „Mathematical Methods of Physics”, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. (1970), S. 96 ff.
- [58] J. M. Brayer, „Introduction to Fourier Transforms for Image Processing”, <https://www.cs.unm.edu/~brayer/vision/fourier.html>, abgerufen am 26.08.2014
- [59] M. Frigo, S. G. Johnson, „Fftw: An adaptive software architecture for fft”, Proc. ICASSP, 3:1381–1384, 1998.
- [60] Homepage „FFTW (Fastest Fourier Transform in the West)”, <http://www.fftw.org/>, abgerufen am 28.12.2014
- [61] B. Chazelle, R. L. Drysdale and D. T. Lee, „Computing the Largest Empty Rectangle”, SIAM J. Comput., Vol. 15, No. 1, Feb. 1986
- [62] M. Orlowski, „A New Algorithm for the Largest Empty Rectangle Problem”, Algorithmica (1990) 5, S. 65-73, 1990
- [63] Homepage „CGAL (Computational Geometry Algorithms Library)”, <http://www.cgal.org>, abgerufen am 30.03.2015

- [64] T. Schmidt, A. Schuster, DLR, interne Untersuchung 2014
- [65] A. Huamán, „Creating Bounding rotated boxes and ellipses for contours”, OpenCV 2.4.9.0-Dokumentation, http://docs.opencv.org/doc/tutorials/imgproc/shapedescriptors/bounding_rotated_ellipses/bounding_rotated_ellipses.html#bounding-rotated-ellipses, abgerufen am 04.02.2015
- [66] S. Großmann, „Mathematischer Einführungskurs für die Physik”, B. G. Teubner, Stuttgart (1988), S. 250 ff.
- [67] A. Schuster et al., „Automatisierte Herstellung eines Rumpfschalendemonstratorbauteils in Integralbauweise”, interner Bericht (in Arbeit)
- [68] Wikipedia-Eintrag „Gantt-Diagramm” <http://de.wikipedia.org/wiki/Gantt-Diagramm>, abgerufen am 30.01.2015
- [69] pointPolygonTest, OpenCV 2.4.9.0-Dokumentation, http://docs.opencv.org/modules/imgproc/doc/structural_analysis_and_shape_descriptors.html?highlight=pointpolygontest#pointpolygontest, abgerufen am 04.02.2014
- [70] T. Schmidt, DLR, interne Untersuchung, 2012
- [71] Projekthomepage MAI-Plast der Spitzencluster-Initiative MAI Carbon, <http://www.mai-carbon.de/index.php/de/cluster-organisation/projekte/produktionssysteme/mai-plast>, abgerufen am 14.04.2015
- [72] M. Kühnel, DLR, Arbeiten zum MAI-Plast-Projekt, 2014

Anhang

Listing 1: Plybook ohne Cutpieces

```
1 <Stacking NAME="Stapelung" TYPE="Engineering">
2   <Plies_Group NAME="Plies_Group.1" DRAPING_DIR="NEGATIVE" ...>
3     <Sequence NAME="Sequence.1">
4       <Ply NAME="Ply.1">
5         <PlyAttributes DRAPING_DIR="NEGATIVE" ORIENTATION="0" ... />
6         <Contour_3D NAME='Contour1'>
7           <OuterContour POINTS_COUNT="3">
8             <Pt>X=0.0 Y=0.0 Z=1.0</Pt>
9             <Pt>X=1.0 Y=0.0 Z=1.0</Pt>
10            <Pt>X=1.0 Y=1.0 Z=1.0</Pt>
11          </OuterContour>
12        </Contour_3D>
13        <Contour_2D POINTS_COUNT="3">
14          <Pt>0.0 0.0 0.0</Pt>
15          <Pt>1.0 0.0 0.0</Pt>
16          <Pt>1.0 1.0 0.0</Pt>
17        </Contour_2D>
18      </Ply>
19    </Sequence>
20  </Plies_Group>
21 ...
22 </Stacking>
```

Listing 2: Plybook mit Cutpieces

```

1 <Stacking NAME="Stapelung" TYPE="Engineering">
2   <Plies_Group NAME="Plies_Group.1" DRAPING_DIR="NEGATIVE" ...>
3     <Sequence NAME="Reihenfolge.1">
4       <Ply NAME="Ply.1">
5         <PlyAttributes DRAPING_DIR="NEGATIVE" ORIENTATION="0" .../>
6         <Contour_3D NAME="Materialueberschuss.49">
7           <OuterContour POINTS_COUNT="34">
8             <Pt>X=804.8 Y=235.402 Z=9.24994</Pt>
9             <Pt>X=804.8 Y=273.365 Z=12.4807</Pt>
10            <Pt>X=804.8 Y=311.283 Z=16.1932</Pt>
11            <Pt>X=804.8 Y=349.151 Z=20.387</Pt>
12            ...
13          </OuterContour>
14        </Contour_3D>
15        <Cut_Piece_Group NAME="Cut_Piece_Group.1">
16          <Cut_Piece NAME="Cut_Piece.2" PERIMETER="4009.38" ...>
17            <Contour_3D NAME="Begrenzungskontur.1135">
18              <OuterContour POINTS_COUNT="18">
19                <Pt>X=804.8 Y=500 Z=41.9601</Pt>
20                <Pt>X=804.8 Y=537.526 Z=48.5485</Pt>
21                <Pt>X=804.8 Y=574.965 Z=55.6129</Pt>
22                ...
23              </OuterContour>
24            </Contour_3D>
25            <Contour_2D>
26              <Contour_2D POINTS_COUNT="18">
27                <Pt>304.807 -121.796 0</Pt>
28                <Pt>304.805 -83.696 0</Pt>
29                <Pt>304.802 -45.5962 0</Pt>
30                ...
31              </Contour_2D>
32            </Cut_Piece>
33            <Cut_Piece NAME="Cut_Piece.1" PERIMETER="4009.38" ...>
34              <Contour_3D NAME="Begrenzungskontur.1134">
35                <OuterContour POINTS_COUNT="18">
36                  <Pt>X=804.8 Y=462.394 Z=35.8488</Pt>
37                  <Pt>X=804.8 Y=424.713 Z=30.2156</Pt>
38                  <Pt>X=804.8 Y=386.963 Z=25.0614</Pt>
39                  ...
40                </OuterContour>
41              </Contour_3D>
42              <Contour_2D POINTS_COUNT="18">
43                <Pt>304.8 -76.1996 0</Pt>
44                <Pt>304.8 -114.299 0</Pt>
45                <Pt>304.8 -152.399 0</Pt>
46                ...
47              </Contour_2D>
48            </Cut_Piece>
49          </Cut_Piece_Group>
50        </Ply>
51      ...
52    </Sequence>
53  ...
54 </Plies_Group>
55 ...
56 </Stacking>

```

Listing 3: ASCII-Export der für den Legevorgang benötigten Informationen

	Nr	Text1	Name	Meilenstein	Nachfolger	Vorgaenger
2	1	choice	BEGIN.Production	Ja	54;28;2	
3	2	entrypoint	BEGIN.PG_LB_1-3	Ja	5;3;4	
4	3	ply	Ply.114	Nein	6	2
5	4	ply	Ply.116	Nein	7	2
6	5	ply	Ply.118	Nein	8	2
7	6	ply	Ply.126	Nein	9	3
8	7	ply	Ply.128	Nein	10	4
9	8	ply	Ply.130	Nein	11	5
10	...					
11	26	ply	Ply.202	Nein	27	23
12	27	break	END.PG_LB_1-3	Ja	104	24;25;26
13	28	nop	BEGIN.PG_LB_2-6	Ja	31;29;30	
14	29	ply	Ply.120	Nein	32	28
15	...					
16	53	break	END.PG_LB_4-6	Ja	104	50;51;52
17	54	nop	BEGIN.PG_KB	Ja	57;55;56;58;59;60	
18	55	ply	Ply.113	Nein	61	54
19	...					
20	102	ply	Ply.207	Nein	103	96
21	103	break	END.PG_KB	Ja	104	97;98;...
22	104	end	END.Production	Ja		53;27;103

Listing 4: Job Definition File (JDF)

```

1 JDF VER 2
2 #001_Ply.01_Cut_Piece.01 Area 0,589365 Perimeter 9208,35 PlyCenter 0,001 1,181
3 -176,783005 -153,985992 0 174,548004 432,842987 -30,4254
4 -112,774002 -153,981995 0 263,27301 432,842987 -30,339899
5 -112,774002 -153,981995 0 263,27301 432,842987 -30,339899
6 ...
7
8 #002_Ply.01_Cut_Piece.02 Area 0,589365 Perimeter 9208,35 PlyCenter -0,001 -0,641
9 110,220001 154,526001 0 683,895996 432,84201 -29,579399
10 -1,17546 154,531006 0 550,281006 432,841003 -29,9272
11 -112,778 154,539993 0 438,88501 432,84201 -30,111401
12 ...
13
14 #Ply.END
15
16 001_Ply.01_Cut_Piece.01.DropTCP.ORIGIN -250 10 1027
17 001_Ply.01_Cut_Piece.01.DropTCP.XAXIS -250 9 1027
18 001_Ply.01_Cut_Piece.01.DropTCP.YAXIS -251 10 1027
19 001_Ply.01_Cut_Piece.01.GripperBits 3 4 5 6 7 8 10 11 12 13 14 15 -1
20 001_Ply.01_Cut_Piece.01.GripPoint.ORIGIN 0,001007 1,181 0
21 001_Ply.01_Cut_Piece.01.GripPoint.XAXIS 1,001007 1,181 0
22 001_Ply.01_Cut_Piece.01.GripPoint.YAXIS 0,001007 1,681 0
23 001_Ply.01_Cut_Piece.01.GripShift.ORIGIN 0 0 0
24 001_Ply.01_Cut_Piece.01.GripShift.XAXIS 1 0 0
25 001_Ply.01_Cut_Piece.01.GripShift.YAXIS 0 0,5 0
26 002_Ply.01_Cut_Piece.02.DropTCP.ORIGIN -250 10 1027
27 002_Ply.01_Cut_Piece.02.DropTCP.XAXIS -250 9 1027
28 002_Ply.01_Cut_Piece.02.DropTCP.YAXIS -251 10 1027
29 002_Ply.01_Cut_Piece.02.GripperBits 3 4 5 6 7 8 10 11 12 13 14 15 -1
30 002_Ply.01_Cut_Piece.02.GripPoint.ORIGIN -0,000916 -0,641479 0
31 002_Ply.01_Cut_Piece.02.GripPoint.XAXIS 0,999084 -0,641479 0
32 002_Ply.01_Cut_Piece.02.GripPoint.YAXIS -0,000916 -0,141479 0
33 002_Ply.01_Cut_Piece.02.GripShift.ORIGIN 0 0 0
34 002_Ply.01_Cut_Piece.02.GripShift.XAXIS 1 0 0
35 002_Ply.01_Cut_Piece.02.GripShift.YAXIS 0 0,5 0
36 ...
37
38 001_Ply.01_Cut_Piece.01.DropPoint.ORIGIN 440,061459 587,9298127 -26,22015492
39 001_Ply.01_Cut_Piece.01.DropPoint.XAXIS 441,0614578 587,9297908 -26,21885439
40 001_Ply.01_Cut_Piece.01.DropPoint.YAXIS 440,0614622 588,4291441 -26,19439977
41 002_Ply.01_Cut_Piece.02.DropPoint.ORIGIN 440,0660117 277,7374186 -26,14879932
42 002_Ply.01_Cut_Piece.02.DropPoint.XAXIS 441,0659293 277,7374345 -26,14854403
43 002_Ply.01_Cut_Piece.02.DropPoint.YAXIS 440,0659992 278,2367543 -26,17353683
44 ...
45
46 003_Ply.02_Cut_Piece.03.WeldPoint 170 202 -1
47 003_Ply.02_Cut_Piece.03.WeldTime 0,5 0,5 -1
48 003_Ply.02_Cut_Piece.03.WeldAmp 70 70 -1
49 004_Ply.02_Cut_Piece.04.WeldPoint 1 174 -1
50 004_Ply.02_Cut_Piece.04.WeldTime 0,5 0,5 -1
51 004_Ply.02_Cut_Piece.04.WeldAmp 70 70 -1
52 ...
53
54 JDF.BEGIN
55 Nr Text1 Name Meilenstein Nachfolger Vorgaenger
56 1 choice BEGIN.Production Ja
57 2 entrypoint BEGIN.PG1 Ja 3
58 3 ply 001_Ply.01_Cut_Piece.01 Nein 4 2
59 4 ply 002_Ply.01_Cut_Piece.02 Nein 5 3
60 ...
61
62 110 ply 108_Ply.40b_VL8_UNCUT Nein 111 109
63 111 break END.PG1 Ja 112 110
64 112 end END.Production Ja 111
65 JDF.END

```

Listing 5: Ausgabe des Programms „PlyLander“

```

1 012_Ply.05_Cut_Piece.12.DropTCP.ORIGIN      -248      0      1027
2 012_Ply.05_Cut_Piece.12.DropTCP.XAXIS       -248      1      1027
3 012_Ply.05_Cut_Piece.12.DropTCP.YAXIS       -247      0      1027
4 012_Ply.05_Cut_Piece.12.GripPoint.ORIGIN     0,638794  -33,752563  0
5 012_Ply.05_Cut_Piece.12.GripPoint.XAXIS     1,638794  -33,752563  0
6 012_Ply.05_Cut_Piece.12.GripPoint.YAXIS     0,638794  -33,252563  0
7 012_Ply.05_Cut_Piece.12.GripShift.ORIGIN     0          0          0
8 012_Ply.05_Cut_Piece.12.GripShift.XAXIS      1          0          0
9 012_Ply.05_Cut_Piece.12.GripShift.YAXIS      0          0,5        0
10 012_Ply.05_Cut_Piece.12.GripperBits         1   2   3   4   5   6   7   8   9  12  13  14  15  -1
11 012_Ply.05_Cut_Piece.12.WeldPoint            1          250      -1
12 012_Ply.05_Cut_Piece.12.WeldTime             0,5        0,5      -1
13 012_Ply.05_Cut_Piece.12.WeldAmp             50         50      -1

```


Danksagung

Mein erster Dank gebührt Herrn Prof. Michael Kupke, der mir die Verwirklichung dieses interdisziplinären Projekts durch sein entgegengebrachtes Vertrauen und die Schaffung der für die Durchführung notwendigen Freiräume ermöglicht hat. Nur Dank der Anlagentechnik am ZLP Augsburg und der großzügig zugeteilten Anlagenzeit war es mir möglich, tief genug in die Materie einzusteigen und die zu Tage tretenden Effekte in gebührender Weise zu untersuchen. Mein allererster Dank aber gehört Prof. Heinz Voggenreiter, der mich vom ersten Tag an motiviert hat, an eine Promotion zu denken. In gleichem Maß danke ich Herrn Dr. Wolfgang Dudenhausen und Herrn Thomas Schmidt, die mir wertvolle Diskussionspartner in der Initialphase dieser Arbeit waren und mir in intensiven Gesprächen sehr geholfen haben, das Thema zu konkretisieren und zu formen.

Meinen geschätzten Kollegen, die ich auf breitester Front mit meinen Fragestellungen bombardieren konnte und die stets ein offenes Ohr und oft auch eine andere Sichtweise hatten, möchte ich für beides meinen Dank aussprechen. Wissenschaft braucht nach meiner Ansicht unabdingbar die Diskussion, und für die Zeit dieser Arbeit wart Ihr mir gute Sparringspartner und habt mir ermöglicht schärfer und weiter zu sehen als ich es allein gekonnt hätte. Besonderen Dank möchte ich meinen Kollegen aus der Robotik ausdrücken, die mich beim Start in die für mich damals neue Welt der Roboterprogrammierung unterstützt haben.

Für die kongeniale Zusammenarbeit in den Use-Cases möchte ich Thomas Schmidt und Michael Kühnel an dieser Stelle danken. Thomas, Dein immenses Wissen in der CFK-Fertigung und Deine Fähigkeiten in CATIA haben mir erst ermöglicht die Dinge so anzugehen wie ich es letztlich gemacht habe. Du warst mit ein guter Coach und Diskussionspartner. Michi, ohne Deine Greifer und Deine Herausforderungen aus den MAI-Plast-Projekten wäre ich nicht so weit gekommen. Unsere fruchtbare Zusammenarbeit am Use-Case 3 habe ich sehr genossen.

Vor allem aber danke ich meiner Familie, ohne deren Verständnis und Unterstützung diese Arbeit nicht durchführbar gewesen wäre: Julia, Helena, Christian, Ihr habt mich oft entbehren müssen, wenn die Anlage lief, und oft auch ertragen, wenn sie nicht lief. Ihr wart und seid für mich ein Quell der Energie und Motivation. Ohne Euch hätte das niemals geklappt: Danke!